



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



LUÍS FELIPE BENTO BESSA

CONSTRUÇÃO DE UM ARCABOUÇO CFD  
PARAMETRIZÁVEL PARA O ESTUDO DE CÉLULAS DE  
ENVELHECIMENTO DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

Uberlândia, MG

2026

# CONSTRUÇÃO DE UM ARCABOUÇO CFD PARAMETRIZÁVEL PARA O ESTUDO DE CÉLULAS DE ENVELHECIMENTO DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

LUÍS FELIPE BENTO BESSA

Projeto de Monografia de graduação apresentado à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte

Uberlândia, MG

2026

LUÍS FELIPE BENTO BESSA

CONSTRUÇÃO DE UM ARCABOUÇO CFD  
PARAMETRIZÁVEL PARA O ESTUDO DE CÉLULAS DE  
ENVELHECIMENTO DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

Projeto de Monografia de graduação apresentado à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte

Uberlândia, MG, 05 de agosto de 2026:

---

**Claudio Roberto Duarte**  
Orientador - FEQUI-UFU

---

**Gabriel Reis Simplicio de Souza**  
FEQUI-UFU

---

**Raphael Dannemann Pires**  
FEQUI-UFU

Uberlândia, MG

2026

*“O que você deixa para trás não é o que é gravado em monumentos de pedra, mas o que é tecido nas vidas de outros.”.*  
*Péricles (490 a.C.-429 a.C.)*

# AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, em especial, os meus pais Renato e Cristiane, pelo suporte e compreensão durante todos esses anos de estudo. Ao meu irmão, Eduardo, pela inabalável amizade e companheirismo desde a infância. Também aos meus avós, Cleusa, Eurípedes, Jesus e Ângela, cuja força, trabalho e dedicação à educação de seus filhos e netos fizeram florescer gerações.

Ao meu orientador Claudio Roberto Duarte, por ter me orientado durante todo este projeto, tendo fornecido recursos, tempo e disponibilidade para seu sucesso, sempre me auxiliando, ensinando e indicando os caminhos.

Ao Doutorando e querido colega Gabriel Reis Simplicio de Souza, pela imensa e indispensável ajuda na concepção e elaboração deste trabalho.

Ao Laboratório de Fluidos Carlos Henrique Ataíde (LabCAF), sede dos experimentos descritos neste trabalho, e todos os seus membros, por tão bem terem me acolhido e ajudado no processo de confecção deste.

Ao PET Engenharia Química, em especial a todos os colegas de grupo e ao tutor Danylo, por cada uma das atividades, ensinamentos, reuniões e minicursos que contribuíram imensamente na minha formação profissional e pessoal.

A todos os meus amigos, cada um de maneiras distintas e únicas, que contribuíram para minha formação e realização pessoal. Serei eternamente grato a cada um de vocês.

A todos os meus colegas de curso, com quem dividi salas e laboratórios ao longo destes anos, por terem compartilhado e vivenciado os fardos e as dádivas comigo.

E a todos que de alguma forma colaboraram para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

# RESUMO

O envelhecimento de fluidos de perfuração é tradicionalmente avaliado em células submetidas a rotação sobre roladores, configuração que não estabelece um campo de cisalhamento bem definido. Células dotadas de impelidor surgem como alternativa, ao impor cisalhamento controlado, mas estão sujeitas ao surgimento de regiões de baixa velocidade, denominadas zonas mortas, que comprometem a uniformidade do tratamento. Neste trabalho, concebeu-se e construiu-se, do zero e em *software* livre, um arcabouço de fluidodinâmica computacional parametrizável para a simulação do escoamento de fluidos de perfuração nessas células. A principal contribuição reside justamente nessa parametrização: a geometria é integralmente definida por variáveis e todo o fluxo de trabalho, da geração da geometria e da malha à solução e ao pós-processamento, é automatizado e reproduzível, de modo que a investigação de novas configurações prescinde de reconstrução manual. As propriedades do fluido foram determinadas experimentalmente por retorta, picnometria a gás e ensaio de tixotropia. O modelo, implementado no OpenFOAM, acopla a formulação Euler-Euler bifásica, o fechamento da fase sólida pela teoria cinética dos escoamentos granulares, a força de arrasto de Gidaspow, a reologia tixotrópica de Houska com evolução temporal do parâmetro estrutural e a representação da rotação do impelidor pelo Modelo de Referência Múltipla, sobre geometria parametrizada em Gmsh. A conservação da massa da fase sólida confirmou a consistência numérica do modelo, cuja solução mostrou-se independente do refinamento da malha. O modelo reproduziu uma zona morta abaixo do impelidor, evidenciada de forma convergente pelos campos de velocidade e de cisalhamento e pelo acúmulo de sólidos. O arcabouço parametrizável desenvolvido constitui uma ferramenta reproduzível para estudos futuros de projeto e otimização de células de envelhecimento de fluidos de perfuração.

**Palavras-chave:** fluidodinâmica computacional. arcabouço parametrizável. fluidos de perfuração. célula de envelhecimento. OpenFOAM.

# ABSTRACT

The aging of drilling fluids is traditionally assessed in cells rotated on roller devices, a configuration that does not establish a well-defined shear field. Impeller-equipped cells arise as an alternative, imposing controlled shear, but are subject to the formation of low-velocity regions, known as dead zones, which compromise treatment uniformity. In this work, a parameterizable Computational Fluid Dynamics framework was conceived and built from scratch, in free software, to simulate the flow of drilling fluids in such cells. The main contribution lies precisely in this parameterization: the geometry is fully defined by variables and the entire workflow, from geometry and mesh generation to solution and post-processing, is automated and reproducible, so that investigating new configurations requires no manual reconstruction. The fluid properties were determined experimentally by retort, gas pycnometry and a thixotropy test. The model, implemented in OpenFOAM, couples the two-phase Euler-Euler formulation, the solid-phase closure by the kinetic theory of granular flow, the Gidaspow drag force, the thixotropic Houska rheology with time evolution of the structural parameter, and the representation of the impeller rotation by the Multiple Reference Frame approach, over a geometry parameterized in Gmsh. The conservation of the solid-phase mass confirmed the numerical consistency of the model, whose solution proved to be independent of mesh refinement. The model reproduced a dead zone below the impeller, consistently evidenced by the velocity and shear-rate fields and by solids accumulation. The developed parameterizable framework constitutes a reproducible tool for future design and optimization studies of drilling-fluid aging cells.

**Keywords:** computational fluid dynamics. parameterizable framework. drilling fluids. aging cell. OpenFOAM.

# LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Ilustração da profundidade das reservas exploradas pela Petrobras S.A., evidenciando as camadas de pós-sal, sal e pré-sal. . . . .                                                                                                                                | 13 |
| Figura 2 – Representação esquemática da broca de perfuração e do sistema de circulação do fluido de perfuração. . . . .                                                                                                                                                      | 14 |
| Figura 3 – Representação esquemática das principais funções do fluido de perfuração durante a operação: (a) transporte de cascalhos, (b) controle de pressão, (c) estabilização das paredes, (d) lubrificação e resfriamento, e (e) suspensão de sólidos em repouso. . . . . | 15 |
| Figura 4 – Representação dos fatores que contribuem para o envelhecimento do fluido de perfuração: degradação térmica, ciclos de cisalhamento, interações químicas com a formação e variações de pressão. . . . .                                                            | 16 |
| Figura 5 – Representação esquemática de reator agitado em CFD: (A) linhas de corrente; (B) trajetórias das partículas. . . . .                                                                                                                                               | 18 |
| Figura 6 – Fluxograma da metodologia incremental adotada neste trabalho. . . . .                                                                                                                                                                                             | 19 |
| Figura 7 – Conjunto de retorta empregado na determinação do teor de sólidos do fluido de perfuração. . . . .                                                                                                                                                                 | 41 |
| Figura 8 – Picnômetro de gás hélio Micromeritics AccuPyc 1330 utilizado na determinação da massa específica. . . . .                                                                                                                                                         | 42 |
| Figura 9 – Curva de fluxo do fluido de perfuração e respectivo ajuste do modelo de Herschel-Bulkley. . . . .                                                                                                                                                                 | 43 |
| Figura 10 – Resposta transiente da viscosidade no ensaio de tixotropia em três intervalos de tempo (3ITT), evidenciando a quebra e a subsequente recuperação estrutural do fluido. Repetição representativa do ensaio realizado em triplicata. . . . .                       | 44 |
| Figura 11 – Geometria da célula de envelhecimento: vaso cilíndrico com o impelidor de pás inclinadas montado centralmente. . . . .                                                                                                                                           | 47 |
| Figura 12 – Detalhe do impelidor de três pás inclinadas a 45°. . . . .                                                                                                                                                                                                       | 48 |
| Figura 13 – Magnitude da velocidade média do fluido ( $\text{m s}^{-1}$ ) em plano vertical contendo o eixo do impelidor. . . . .                                                                                                                                            | 58 |
| Figura 14 – Magnitude do gradiente de velocidade ( $\text{s}^{-1}$ ), proporcional à taxa de cisalhamento, em plano vertical, em escala logarítmica. . . . .                                                                                                                 | 59 |
| Figura 15 – Perfil axial da magnitude da velocidade média ( $\text{m s}^{-1}$ ) ao longo do eixo central do vaso. A faixa sombreada corresponde ao eixo do impelidor, onde não há fluido. . . . .                                                                            | 59 |
| Figura 16 – Perfil radial da magnitude da velocidade média ( $\text{m s}^{-1}$ ) ao longo do diâmetro do vaso, na altura do impelidor. A faixa sombreada corresponde ao eixo, onde não há fluido. . . . .                                                                    | 60 |

Figura 17 – Fração volumétrica de sólidos (adimensional) em plano vertical. O acúmulo no fundo, abaixo do impelidor, coincide com a região de baixa velocidade e baixo cisalhamento. . . . . 61

# LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Formulação do fluido de perfuração de base olefínica empregado neste trabalho. As concentrações são expressas em unidades de campo (lb/bbl e bbl/bbl). | 40 |
| Tabela 2 – Propriedades físicas do fluido e da fase sólida empregadas na simulação. . . .                                                                         | 44 |
| Tabela 3 – Dimensões geométricas da célula de envelhecimento e do impelidor. . . . .                                                                              | 46 |
| Tabela 4 – Esquemas numéricos adotados na discretização. . . . .                                                                                                  | 51 |
| Tabela 5 – Teste de independência de malha baseado na velocidade quadrática média (RMS) do escoamento. . . . .                                                    | 57 |

# SUMÁRIO

|       |                                                                     |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUÇÃO . . . . .                                                | 12 |
| 2     | FUNDAMENTOS TEÓRICOS . . . . .                                      | 21 |
| 2.1   | REOLOGIA DE FLUIDOS . . . . .                                       | 21 |
| 2.1.1 | CONCEITOS FUNDAMENTAIS . . . . .                                    | 21 |
| 2.1.2 | FLUIDOS NÃO-NEWTONIANOS . . . . .                                   | 22 |
| 2.1.3 | MODELOS REOLÓGICOS PARA FLUIDOS NÃO-NEWTONIANOS . .                 | 23 |
| 2.2   | TIXOTROPIA . . . . .                                                | 25 |
| 2.2.1 | MECANISMO FÍSICO DA TIXOTROPIA . . . . .                            | 25 |
| 2.2.2 | CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA TIXOTROPIA . . . . .                 | 26 |
| 2.2.3 | MODELOS MATEMÁTICOS PARA TIXOTROPIA . . . . .                       | 27 |
| 2.3   | ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS . . . . .                                  | 29 |
| 2.3.1 | ABORDAGENS DE MODELAGEM MULTIFÁSICA . . . . .                       | 29 |
| 2.3.2 | MODELO EULER-EULER DE DUAS FASES . . . . .                          | 29 |
| 2.3.3 | FORÇAS DE INTERAÇÃO ENTRE FASES . . . . .                           | 30 |
| 2.3.4 | PROPRIEDADES DA FASE SÓLIDA . . . . .                               | 31 |
| 2.4   | FUNDAMENTOS DE DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL                   | 32 |
| 2.4.1 | EQUAÇÕES GOVERNANTES . . . . .                                      | 32 |
| 2.4.2 | MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS . . . . .                                | 33 |
| 2.4.3 | ACOPLAMENTO PRESSÃO-VELOCIDADE . . . . .                            | 34 |
| 2.4.4 | MODELAGEM DE ROTAÇÃO: MODELO MRF . . . . .                          | 34 |
| 2.5   | FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS . . . . .                                | 35 |
| 2.5.1 | OPENFOAM . . . . .                                                  | 35 |
| 2.5.2 | GMSH . . . . .                                                      | 36 |
| 2.5.3 | PARAVIEW . . . . .                                                  | 37 |
| 2.5.4 | INTEGRAÇÃO DO FLUXO DE TRABALHO . . . . .                           | 38 |
| 3     | METODOLOGIA . . . . .                                               | 39 |
| 3.1   | CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO FLUIDO . . . . .                     | 39 |
| 3.1.1 | O FLUIDO DE PERFURAÇÃO ESTUDADO . . . . .                           | 39 |
| 3.1.2 | DETERMINAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS POR RETORTA . . . . .               | 40 |
| 3.1.3 | DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA POR PICNOMETRIA<br>A GÁS . . . . . | 41 |
| 3.1.4 | CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA E TIXOTRÓPICA . . . . .                    | 41 |
| 3.1.5 | SÍNTESE DOS DADOS DE ENTRADA . . . . .                              | 44 |
| 3.2   | CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL . .                  | 45 |

|        |                                                                            |    |
|--------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.1  | ESTRATÉGIA DE CONSTRUÇÃO INCREMENTAL . . . . .                             | 45 |
| 3.2.2  | GEOMETRIA PARAMÉTRICA . . . . .                                            | 45 |
| 3.2.3  | GERAÇÃO E VERIFICAÇÃO DA MALHA . . . . .                                   | 46 |
| 3.2.4  | MODELAGEM MULTIFÁSICA E FECHAMENTOS CONSTITUTIVOS .                        | 48 |
| 3.2.5  | MODELAGEM DA ROTAÇÃO E CONDIÇÕES DE CONTORNO . . . .                       | 49 |
| 3.2.6  | CONDIÇÕES INICIAIS . . . . .                                               | 50 |
| 3.2.7  | ESQUEMAS NUMÉRICOS E CONTROLE DA SOLUÇÃO . . . . .                         | 51 |
| 3.2.8  | CRITÉRIOS DE CONVERGÊNCIA . . . . .                                        | 52 |
| 3.2.9  | PROCESSAMENTO PARALELO E AUTOMAÇÃO DO FLUXO DE<br>TRABALHO . . . . .       | 52 |
| 3.2.10 | PÓS-PROCESSAMENTO E EXTRAÇÃO DE RESULTADOS . . . . .                       | 53 |
| 3.2.11 | CARACTERIZAÇÃO ADIMENSIONAL DO ESCOAMENTO . . . . .                        | 53 |
| 3.2.12 | CRITÉRIO DE IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES ESTAGNADAS . . . .                    | 54 |
| 3.2.13 | LIMITAÇÕES DA ABORDAGEM ADOTADA . . . . .                                  | 55 |
| 3.3    | USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ELABORAÇÃO DESTA<br>MONOGRAFIA . . . . . | 55 |
| 4      | RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .                                          | 56 |
| 4.1    | VERIFICAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO . . . . .                                   | 56 |
| 4.2    | CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO . . . . .                                     | 57 |
| 4.3    | DEMONSTRAÇÃO DE CAPACIDADE: REPRODUÇÃO DA ZONA<br>MORTA . . . . .          | 58 |
| 4.4    | DEMONSTRAÇÃO DA PARAMETRIZAÇÃO E DO POTENCIAL PARA<br>OTIMIZAÇÃO . . . . . | 61 |
| 5      | CONCLUSÕES E SUGESTÕES . . . . .                                           | 64 |
| 5.1    | CONTRIBUIÇÕES NA FORMAÇÃO PROFISSIONAL . . . . .                           | 64 |
| 5.2    | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .                                 | 65 |
|        | REFERÊNCIAS . . . . .                                                      | 67 |

# 1 INTRODUÇÃO

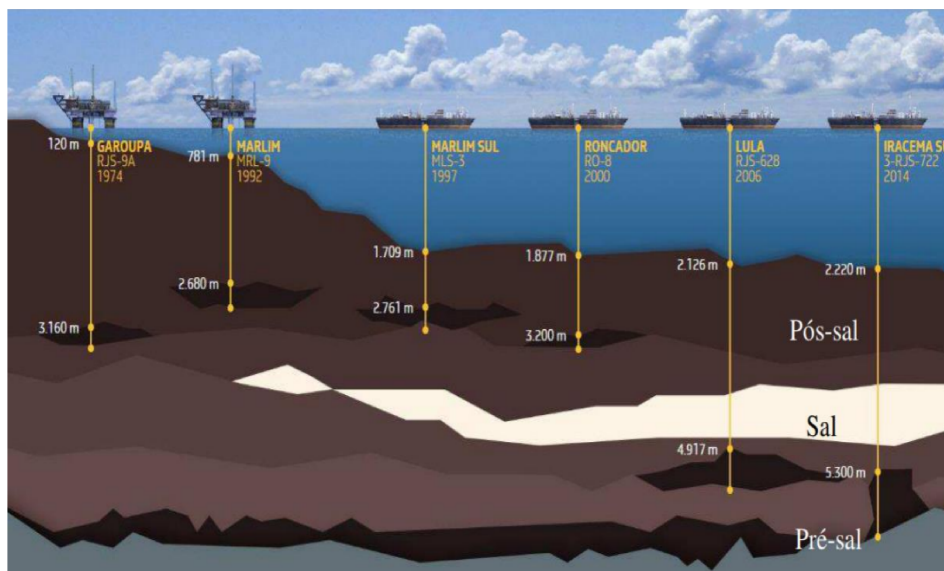
O petróleo está presente no cotidiano das pessoas em diversas situações, sendo utilizado como matéria-prima para a produção de combustíveis, plásticos, embalagens, fertilizantes, asfalto, lubrificantes, produtos farmacêuticos e têxteis sintéticos. Desta forma, desempenha forte influência na dinâmica do sistema econômico e geopolítico mundial (THOMAS, 2001). A indústria de petróleo e gás representa um dos pilares fundamentais da matriz energética mundial, sendo responsável por suprir aproximadamente 30% da demanda global de energia primária, mesmo diante do avanço das fontes renováveis (International Energy Agency, 2024). Nesse contexto, a perfuração de poços constitui uma etapa crítica e desafiadora, envolvendo a penetração de formações rochosas heterogêneas sob condições extremas de pressão e temperatura. O sucesso dessas operações depende intrinsecamente do desempenho dos fluidos de perfuração, sistemas complexos que desempenham múltiplas funções simultâneas durante todo o processo de construção do poço (CHHABRA; RICHARDSON, 2008).

Este recurso natural é resultado da decomposição de materiais orgânicos, predominantemente de origem marinha, cobertos por camadas de rochas sedimentares em condições específicas de pressão, temperatura e ausência de oxigênio ao longo de milhões de anos (THOMAS, 2001). Estes hidrocarbonetos, por serem menos densos que a água, migram através das formações rochosas porosas até encontrarem barreiras impermeáveis que os aprisionam, formando os reservatórios que constituem o alvo das operações de exploração e produção. Atualmente, as maiores reservas são encontradas no fundo dos oceanos, em especial no Brasil, na região do pré-sal (Petrobras, 2024b).

O pré-sal brasileiro consiste em uma sequência de rochas sedimentares formadas há mais de 100 milhões de anos com a separação dos continentes sul-americano e africano (Pré-Sal Petróleo S.A., 2024). Com essa separação, surgiram grandes depressões que deram origem a diversos lagos, onde se acumularam grandes quantidades de matéria orgânica de algas microscópicas. Esta matéria orgânica, misturada a sedimentos, formou as rochas geradoras de óleo e gás do pré-sal. Devido ao clima árido predominante naquele período geológico, a evaporação intensa da água marinha provocou a acumulação de sais, criando a espessa camada de sal que funciona como um selo, impedindo que o petróleo escape e chegue à superfície (Petrobras, 2024b; Pré-Sal Petróleo S.A., 2024). Os reservatórios do pré-sal estendem-se por aproximadamente 800 quilômetros ao longo do litoral brasileiro, do Espírito Santo a Santa Catarina, situando-se a profundidades que variam de 1.000 a 2.000 metros de lâmina d'água e entre 4.000 e 6.000 metros de profundidade no subsolo (Pré-Sal Petróleo S.A., 2024). A profundidade total, ou seja, a distância entre a superfície do mar e os reservatórios de petróleo abaixo da camada de sal, pode ultrapassar 7.000 metros, valor equivalente à altura do ponto mais alto da Cordilheira dos Andes, conforme ilustrado na Figura 1 (Petrobras, 2024b). As reservas são compostas por

grandes acumulações de óleo leve, de excelente qualidade e alto valor comercial, o que justifica os investimentos massivos em tecnologias de perfuração para ambientes de alta complexidade (Pré-Sal Petróleo S.A., 2024).

Figura 1 – Ilustração da profundidade das reservas exploradas pela Petrobras S.A., evidenciando as camadas de pós-sal, sal e pré-sal.



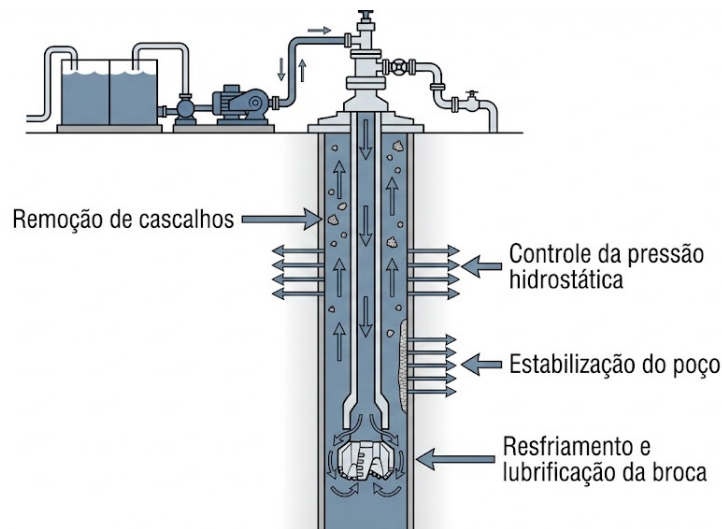
Fonte: Petrobras S.A.

A produtividade excepcional dos campos do pré-sal brasileiro tem estabelecido recordes sucessivos na indústria mundial. A produção diária de petróleo no pré-sal passou da média de aproximadamente 41 mil barris por dia em 2010 para o patamar de 3,7 milhões de barris de óleo equivalente por dia em 2024, representando aproximadamente 80% da produção total da Petrobras (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2024; Petrobras, 2024a). O campo de Búzios, considerado o maior em águas ultraprofundas do mundo, alcançou em 2025 o marco histórico de 1 milhão de barris de petróleo por dia, com expectativa de ultrapassar 2 milhões até 2030 (Petrobras, 2024b). Se fosse um país, o pré-sal brasileiro ocuparia o 11º lugar no ranking mundial dos produtores de petróleo (Petrobras, 2023). Essa alta produtividade, associada a custos de extração competitivos entre 13 e 19 dólares por barril, justifica os contínuos investimentos em tecnologias de perfuração para esses ambientes de alta complexidade (Petrobras, 2024b).

Diante deste cenário de crescente produção e das profundidades extremas envolvidas, a perfuração de poços constitui uma das etapas mais críticas e onerosas da cadeia de exploração e produção de petróleo. Do ponto de vista operacional, perfurar um poço consiste em promover a penetração controlada através de formações rochosas heterogêneas, desde o leito marinho até o reservatório produtor, criando um conduto que permita o acesso aos hidrocarbonetos e sua posterior produção (BOURGOYNE JR. et al., 1986; THOMAS, 2001). Este processo envolve a utilização de uma sonda de perfuração, equipamento que sustenta e movimenta uma coluna de tubos de aço (coluna de perfuração) em cuja extremidade inferior está acoplada a

broca, ferramenta responsável pela fragmentação mecânica das rochas, conforme apresentado esquematicamente na Figura 2. O fluido de perfuração, ao ser bombeado para o interior do poço através da coluna, é injetado em forma de jato através de bocais presentes na broca, retornando à superfície pelo espaço anular entre a coluna e as paredes do poço (CAENN; DARLEY; GRAY, 2011).

Figura 2 – Representação esquemática da broca de perfuração e do sistema de circulação do fluido de perfuração.

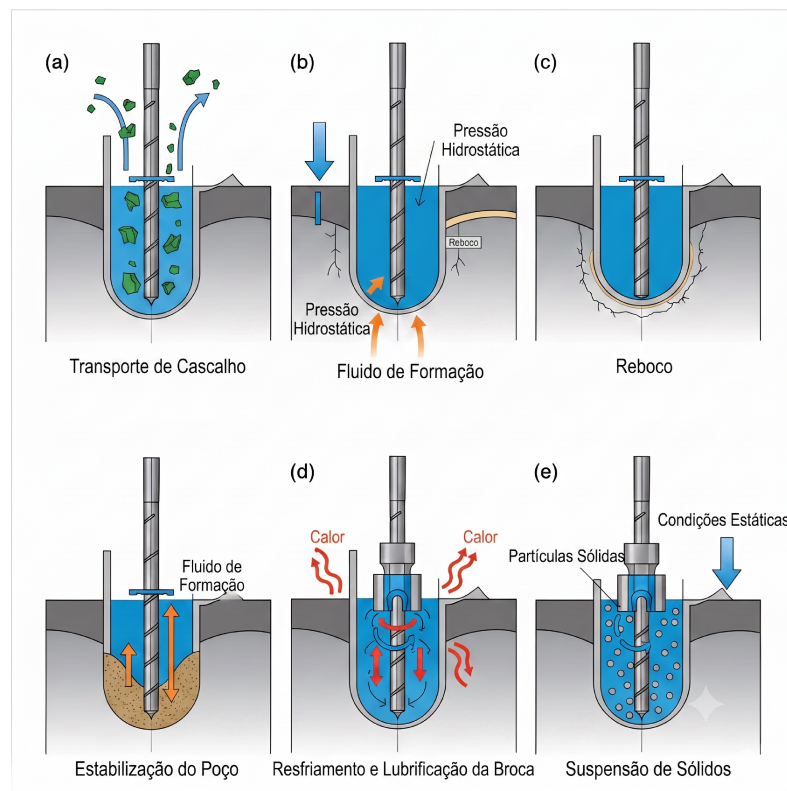


Fonte: Autor.

Os fluidos de perfuração, também denominados lamas de perfuração, são formulações multicomponentes cuidadosamente projetadas para atender a requisitos operacionais específicos e frequentemente conflitantes (CAENN; DARLEY; GRAY, 2011). Entre suas funções primordiais destacam-se: a remoção contínua dos cascalhos gerados pela broca, transportando-os do fundo do poço até a superfície através do espaço anular para posterior limpeza e reinjeção do fluido no sistema; o controle da pressão hidrostática da coluna de fluido para prevenir influxos indesejados de fluidos da formação (*kick*) ou perdas de circulação para formações permeáveis; a estabilização química e mecânica das paredes do poço, prevenindo desmoronamentos e a hidratação de argilas reativas; o resfriamento e a lubrificação do conjunto broca-coluna de perfuração, dissipando o calor gerado pelo atrito e reduzindo o desgaste dos componentes; a transmissão de potência hidráulica para ferramentas de fundo, como motores e sistemas de direcionamento; e, crucialmente, a manutenção dos cascalhos e materiais densificantes em suspensão durante paradas operacionais ou confinamento do fluido (CHHABRA; RICHARDSON, 2008; BOURGOYNE JR. et al., 1986). A Figura 3 sintetiza as principais funções desempenhadas pelo fluido de perfuração durante a operação.

A composição dos fluidos de perfuração varia significativamente conforme as características das formações a serem atravessadas e as condições operacionais específicas de cada poço, podendo ser classificados em três categorias principais quanto à sua base: fluidos de base aquosa, de base oleosa e de base sintética (CAENN; DARLEY; GRAY, 2011). Os fluidos de base aquosa

Figura 3 – Representação esquemática das principais funções do fluido de perfuração durante a operação: (a) transporte de cascalhos, (b) controle de pressão, (c) estabilização das paredes, (d) lubrificação e resfriamento, e (e) suspensão de sólidos em repouso.



Fonte: Autor.

são os mais utilizados devido ao menor custo e facilidade de descarte, sendo adequados para a maioria das aplicações convencionais. Os fluidos de base oleosa oferecem desempenho superior em formações reativas e ambientes de alta temperatura, porém apresentam restrições ambientais significativas para descarte. Os fluidos de base sintética, particularmente aqueles formulados com olefinas lineares, têm ganhado destaque crescente por combinarem o desempenho técnico dos fluidos oleosos com um perfil ambiental mais favorável, sendo especialmente indicados para poços de alta complexidade como os do pré-sal brasileiro (SOUZA et al., 2023).

Esses sistemas sintéticos são tipicamente constituídos por emulsões inversas (água em óleo), nas quais a fase contínua orgânica é composta pela olefina, enquanto a fase aquosa dispersa consiste em salmoura estabilizada por emulsificantes específicos (CAENN; DARLEY; GRAY, 2011). A essa matriz básica são adicionados agentes densificantes como barita (sulfato de bário, densidade 4,10 g/cm<sup>3</sup>) ou hematita (óxido de ferro III, densidade 5,05 g/cm<sup>3</sup>), que conferem peso ao fluido para controle da pressão hidrostática; controladores de filtrado, que reduzem a perda de fase líquida para as formações; viscosificantes organofílicos, que conferem as propriedades reológicas desejadas; e demais aditivos funcionais específicos para cada aplicação (CAENN; DARLEY; GRAY, 2011; THOMAS, 2001).

Durante as operações de campo, os fluidos de perfuração são submetidos a condições

severas e prolongadas que induzem alterações progressivas e muitas vezes irreversíveis em suas propriedades. Este fenômeno, conhecido como “envelhecimento”, resulta da combinação de fatores térmicos, mecânicos e químicos que atuam sobre os componentes do fluido ao longo do tempo, conforme ilustrado na Figura 4 (FARIAS; AMORIM; SILVA, 2010; SOUZA et al., 2023). As temperaturas de fundo de poço podem exceder 150°C em reservatórios profundos, promovendo a degradação térmica de polímeros e emulsificantes. As pressões atingem centenas de bar, podendo alterar o equilíbrio de fases e a solubilidade de aditivos. Simultaneamente, o fluido experimenta ciclos repetidos de cisalhamento intenso durante o bombeamento, alternados com períodos de repouso durante conexões de tubulação, além de interações químicas com os fluidos e minerais da formação que podem contaminar e desestabilizar o sistema (FARIAS; AMORIM; SILVA, 2010).

Figura 4 – Representação dos fatores que contribuem para o envelhecimento do fluido de perfuração: degradação térmica, ciclos de cisalhamento, interações químicas com a formação e variações de pressão.



Fonte: Autor.

As consequências do envelhecimento incluem alterações significativas nas propriedades reológicas do fluido, como aumento ou diminuição da viscosidade plástica, modificação da tensão de escoamento, alteração do comportamento tixotrópico, perda da força gel e degradação das propriedades de filtração (FARIAS; AMORIM; SILVA, 2010). Essas mudanças podem comprometer a capacidade de transporte de cascalhos, aumentar as perdas de carga durante a circulação, causar problemas de *swab* e *surge* durante manobras de coluna, induzir a prisão da broca por acúmulo de sólidos sedimentados e, em casos extremos, levar à perda total do poço. Os custos associados a falhas relacionadas ao fluido de perfuração são substanciais, podendo atingir dezenas de milhões de dólares em operações *offshore* de águas profundas, sem considerar

os impactos ambientais e os riscos à segurança operacional (BOURGOYNE JR. et al., 1986).

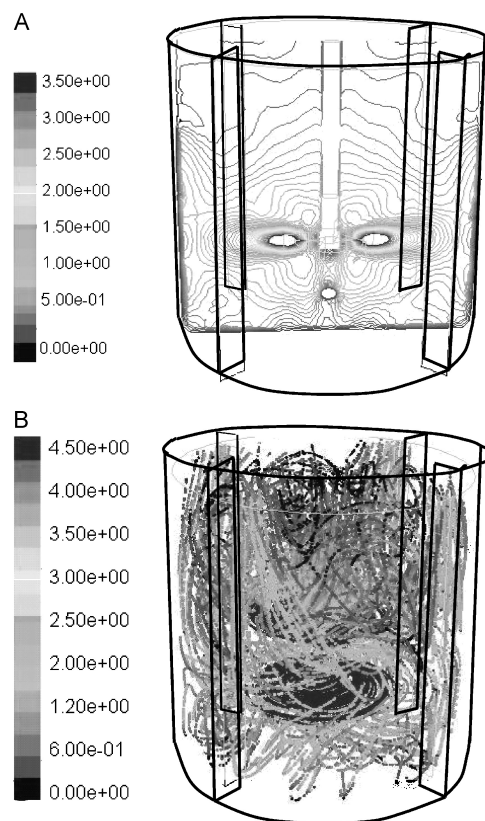
A caracterização laboratorial do envelhecimento de fluidos de perfuração é tradicionalmente realizada em células de envelhecimento estático ou dinâmico, equipamentos pressurizados dotados de sistemas de aquecimento que reproduzem as condições de alta pressão e alta temperatura (HPHT, *High Pressure High Temperature*) do fundo do poço (FARIAS; AMORIM; SILVA, 2010; CERNN, 2022). Nas células de envelhecimento dinâmico convencionais, o recipiente contendo o fluido é submetido a rotação sobre roladores (*roller ovens*), configuração que mantém o fluido em movimento, mas que não estabelece um campo de cisalhamento bem definido nem controlável, uma vez que a sollicitação mecânica imposta depende de forma complexa da geometria do recipiente e de seu preenchimento, permanecendo mal caracterizada (OLIVEIRA, 2021). Como alternativa, células de envelhecimento dotadas de um impelidor de mistura permitem a imposição de um campo de cisalhamento controlado e mensurável ao longo de todo o ensaio, aproximando as condições laboratoriais das sollicitações mecânicas experimentadas pelo fluido durante a circulação no espaço anular do poço. Ainda assim, a relação entre a agitação imposta e o cisalhamento real no poço permanece frequentemente desconhecida, e a própria ação do impelidor não é uniforme em todo o volume, o que motiva a análise detalhada da hidrodinâmica interna desses equipamentos.

Em particular, quando o fluido de perfuração apresenta tensão de escoamento, a agitação mecânica tende a gerar uma região intensamente misturada nas imediações do impelidor, denominada caverna, cercada por material praticamente estagnado, no qual a tensão local permanece inferior à tensão de escoamento e o fluido não escoar (SOLOMON; NIENOW; PACE, 1981; AMANULLAH; HJORTH; NIENOW, 1998; XIAO et al., 2014). Essas regiões de baixa velocidade, comumente designadas zonas mortas, comprometem a uniformidade do tratamento aplicado ao fluido e podem mascarar os mecanismos reais de degradação, conduzindo a conclusões equivocadas a respeito do desempenho reológico. A identificação e a caracterização dessas zonas são, portanto, essenciais para avaliar a representatividade dos ensaios de envelhecimento. A otimização dos testes de envelhecimento em laboratório apresenta desafios consideráveis. A variação experimental de parâmetros geométricos do rotor, como dimensões das pás, ângulo de inclinação, folgas em relação às paredes e ao fundo do reator, é um processo custoso, demorado e que oferece acesso extremamente limitado aos campos de escoamento no interior do equipamento (OLIVEIRA, 2021). Técnicas experimentais de medição de velocidade, como PIV (*Particle Image Velocimetry*) ou LDA (*Laser Doppler Anemometry*), são de difícil aplicação em sistemas pressurizados operando com fluidos opacos e densos, restringindo severamente a compreensão da hidrodinâmica do processo e impossibilitando a correlação direta entre as condições de cisalhamento impostas e o grau de envelhecimento observado.

Nesse contexto, a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*) emerge como uma ferramenta de engenharia indispensável para superar essas limitações (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007; FERZIGER; PERIĆ, 2002). A CFD

permite a resolução numérica das equações governantes do escoamento (conservação da massa, quantidade de movimento e energia), fornecendo informações detalhadas sobre os campos de ambas as fases, fluida e sólida: são obtidas velocidade, pressão e taxa de cisalhamento, entre outras grandezas de interesse, em todo o domínio computacional, conforme exemplificado na Figura 5. Diferentemente dos experimentos físicos, as simulações numéricas possibilitam a visualização completa do escoamento em regiões inacessíveis à instrumentação, a exploração sistemática de um vasto espaço de parâmetros geométricos e operacionais, e a realização de análises paramétricas com custo e tempo significativamente reduzidos, permitindo a otimização virtual de configurações de equipamentos antes de sua fabricação (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Figura 5 – Representação esquemática de reator agitado em CFD: (A) linhas de corrente; (B) trajetórias das partículas.

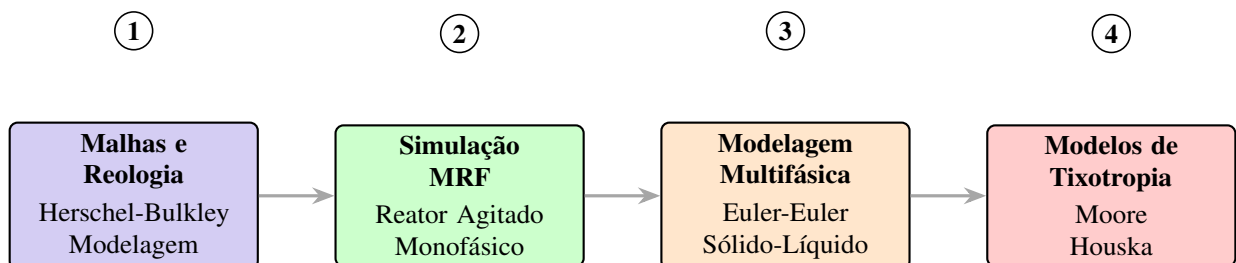


Fonte: (MURTHY; GHADGE; JOSHI, 2007)

A aplicação de CFD para a simulação de tanques agitados é um campo bem estabelecido na literatura, com diversos trabalhos abordando aspectos como a modelagem de impelidores rotativos através do Modelo de Referência Múltipla (MRF) ou de malhas deslizantes, a representação da turbulência mediante modelos RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) e o comportamento de sistemas multifásicos sólido-líquido através da abordagem Euler-Euler (ZHANG; ZHANG; LI, 2011; PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004; MURTHY; GHADGE; JOSHI, 2007; SHI; RZEHAKE, 2020). Estudos específicos têm igualmente descrito a formação de cavernas e zonas mortas em fluidos viscoplásticos agitados (XIAO et al., 2014). Contudo, a integração,

em um único arcabouço computacional, de modelos reológicos não-Newtonianos avançados, incluindo comportamento viscoplástico e tixotrópico dependente do tempo, com a simulação de escoamentos rotacionais multifásicos, construída de forma aberta e parametrizável em *software* livre, ainda representa uma lacuna relevante na literatura, particularmente quando o objetivo é subsidiar o estudo do envelhecimento de fluidos de perfuração. O presente trabalho tem como objetivo geral conceber, fundamentar e construir, do zero e em *software* livre, um modelo computacional baseado em CFD para a simulação do escoamento de fluidos de perfuração em células de envelhecimento de laboratório dotadas de impelidor. Diferentemente de uma abordagem voltada exclusivamente à obtenção de um resultado pontual, busca-se estabelecer um modelo numericamente estável e parametrizável, capaz de servir de base para a formulação de novas hipóteses e para a otimização de estudos futuros do envelhecimento de fluidos de perfuração. A Figura 6 apresenta o fluxograma da metodologia incremental adotada neste trabalho. A plataforma computacional é construída utilizando o *software* livre OpenFOAM, que oferece flexibilidade para a implementação de modelos físicos personalizados, adaptação de *solvers* existentes e integração com ferramentas de pré e pós-processamento (OpenFOAM Foundation, 2024). A metodologia adotada é incremental, incorporando progressivamente níveis crescentes de complexidade física ao modelo, e entre os fenômenos por ele reproduzidos figura a formação de uma zona morta abaixo do impelidor, empregada como demonstração da capacidade do arcabouço em representar a hidrodinâmica característica dessas células.

Figura 6 – Fluxograma da metodologia incremental adotada neste trabalho.



Fonte: Autor.

Os objetivos específicos deste trabalho incluem:

- Implementar e verificar modelos reológicos não-Newtonianos, partindo do modelo viscoplástico de Herschel-Bulkley e culminando no modelo tixotrópico de Houska, para a descrição do comportamento do fluido de perfuração;
- Construir simulações de escoamento em células agitadas utilizando o Modelo de Referência Múltipla (MRF) para a representação do movimento rotativo do impelidor, de forma parametrizável quanto à geometria e às condições operacionais;
- Incorporar a modelagem multifásica Euler-Euler, com fechamento por teoria cinética granular e força de arrasto de Gidaspow, para representar a interação entre a fase fluida contínua e as partículas sólidas em suspensão;

- Automatizar o fluxo de trabalho, desde a geração paramétrica da geometria até o pós-processamento, garantindo a reprodutibilidade e viabilizando a variação sistemática de parâmetros;
- Demonstrar a capacidade do modelo por meio da reprodução de uma zona morta abaixo do impelidor, caracterizada de forma consistente pelos campos de velocidade e de cisalhamento e pelo acúmulo de sólidos, estabelecendo as bases para análises paramétricas futuras.

A relevância deste trabalho reside na contribuição para o aprimoramento das metodologias de caracterização de fluidos de perfuração em laboratório, fornecendo diretrizes fundamentadas em simulação numérica para o projeto de equipamentos de teste mais representativos das condições reais de campo. O modelo computacional desenvolvido poderá ser utilizado como ferramenta preditiva para o comportamento reológico de fluidos sob diferentes históricos termomecânicos, auxiliando tanto no desenvolvimento de formulações mais estáveis quanto na otimização de procedimentos de controle de qualidade. Adicionalmente, a metodologia proposta contribui para a redução de custos e tempo associados a campanhas experimentais extensivas, viabilizando a exploração virtual de configurações antes de sua implementação física.

Este documento está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta os fundamentos teóricos necessários à compreensão do trabalho, abrangendo a reologia de fluidos não-Newtonianos, os modelos constitutivos de viscosidade e de tixotropia, os fundamentos de escoamentos multifásicos e os princípios da dinâmica dos fluidos computacional aplicada a reatores agitados. O Capítulo 3 descreve a metodologia empregada, contemplando tanto a caracterização experimental do fluido, com os equipamentos utilizados e seu manuseio, quanto a concepção, a construção e a verificação do modelo computacional. O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos, incluindo a verificação numérica do modelo, a caracterização do escoamento, a reprodução da zona morta e a demonstração da parametrização do arcabouço. Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e as sugestões para desenvolvimentos futuros.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos necessários para a compreensão e desenvolvimento do presente trabalho. Inicialmente, são abordados os conceitos fundamentais de reologia e os modelos constitutivos para fluidos não-Newtonianos. Em seguida, discute-se a tixotropia e os modelos matemáticos para sua descrição. Os fundamentos de escoamentos multifásicos e os modelos de interação entre fases são então apresentados. Por fim, são descritos os princípios da Dinâmica dos Fluidos Computacional e as ferramentas numéricas empregadas neste trabalho.

### 2.1 REOLOGIA DE FLUIDOS

A reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento de materiais sob a ação de tensões aplicadas. O termo deriva das palavras gregas *rheos* (fluxo) e *logos* (estudo), tendo sido cunhado por Eugene Bingham em 1929 para descrever o campo de estudo que se situa na interface entre a mecânica dos sólidos e a mecânica dos fluidos (BINGHAM, 1916; MEZGER, 2014).

#### 2.1.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

A caracterização reológica de um material baseia-se na relação entre a tensão de cisalhamento aplicada ( $\tau$ ) e a deformação resultante ou sua taxa temporal. Para um elemento de fluido submetido a um escoamento cisalhante simples, a tensão de cisalhamento é definida como a força tangencial por unidade de área:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad [\text{Pa}] \quad (2.1)$$

onde  $F$  é a força tangencial aplicada e  $A$  é a área sobre a qual a força atua.

A taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ) representa a velocidade com que as camadas adjacentes do fluido deslizam umas sobre as outras, sendo definida como o gradiente de velocidade na direção perpendicular ao escoamento:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (2.2)$$

onde  $v$  é a velocidade do fluido e  $y$  é a coordenada perpendicular à direção do escoamento.

A viscosidade dinâmica ( $\eta$ ) é a propriedade que quantifica a resistência do fluido ao escoamento, sendo definida como a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [\text{Pa}\cdot\text{s}] \quad (2.3)$$

Para fluidos Newtonianos, a viscosidade é uma constante que depende apenas da temperatura e da pressão, independentemente da taxa de cisalhamento aplicada. A relação constitutiva para esses materiais é linear:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.4)$$

representando uma reta que passa pela origem quando  $\tau$  é plotado em função de  $\dot{\gamma}$  (CHHABRA; RICHARDSON, 2008).

### 2.1.2 FLUIDOS NÃO-NEWTONIANOS

A grande maioria dos fluidos de interesse industrial, incluindo os fluidos de perfuração, não obedece à relação linear da Equação 2.4. Esses materiais são classificados como fluidos não-Newtonianos e apresentam viscosidade aparente que varia em função da taxa de cisalhamento, do tempo de aplicação do esforço, ou de ambos (CHHABRA; RICHARDSON, 2008).

Os fluidos não-Newtonianos podem ser classificados em três categorias principais:

1. **Fluidos independentes do tempo:** a viscosidade depende apenas da taxa de cisalhamento instantânea, não apresentando efeitos de memória;
2. **Fluidos dependentes do tempo:** a viscosidade depende não apenas da taxa de cisalhamento, mas também do histórico de deformação do material;
3. **Fluidos viscoelásticos:** apresentam simultaneamente características viscosas (dissipação de energia) e elásticas (armazenamento de energia).

#### 2.1.2.1 FLUIDOS INDEPENDENTES DO TEMPO

Entre os fluidos independentes do tempo, destacam-se os comportamentos pseudoplástico (*shear-thinning*), dilatante (*shear-thickening*) e viscoplástico.

**Fluidos pseudoplásticos** apresentam diminuição da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento. Este comportamento é característico de suspensões poliméricas e emulsões, onde as estruturas moleculares ou coloidais se alinham progressivamente na direção do escoamento sob cisalhamento crescente, oferecendo menor resistência ao fluxo (CHHABRA; RICHARDSON, 2008). Os fluidos de perfuração tipicamente exibem comportamento pseudoplástico pronunciado.

**Fluidos dilatantes** apresentam o comportamento oposto, com aumento da viscosidade sob taxas de cisalhamento crescentes. Este comportamento é menos comum e ocorre em suspensões concentradas de partículas sólidas, onde o cisalhamento provoca dilatação volumétrica e aumento da resistência ao escoamento (CHHABRA; RICHARDSON, 2008).

**Fluidos viscoplásticos** (ou fluidos com tensão de escoamento) são materiais que se comportam como sólidos quando submetidos a tensões inferiores a um valor crítico denominado tensão de escoamento ( $\tau_0$ ), e escoam como fluidos viscosos quando essa tensão é excedida (BINGHAM, 1916; COUSSOT et al., 2002). Matematicamente:

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = 0 & \text{se } |\tau| < \tau_0 \\ \tau = f(\dot{\gamma}) & \text{se } |\tau| \geq \tau_0 \end{cases} \quad (2.5)$$

A tensão de escoamento é uma propriedade crucial para fluidos de perfuração, pois determina a capacidade do fluido de manter sólidos em suspensão quando em repouso. Partículas com peso submerso inferior à tensão de escoamento permanecerão suspensas indefinidamente, enquanto partículas mais densas sedimentarão (BOURGOYNE JR. et al., 1986).

### 2.1.3 MODELOS REOLÓGICOS PARA FLUIDOS NÃO-NEWTONIANOS

Diversos modelos matemáticos foram desenvolvidos para descrever o comportamento reológico de fluidos não-Newtonianos. A seleção do modelo apropriado depende das características do fluido e da faixa de taxas de cisalhamento de interesse.

#### 2.1.3.1 MODELO DE OSTWALD-DE WAELE (LEI DE POTÊNCIA)

O modelo de Ostwald-de Waele, também conhecido como Lei de Potência, é uma das representações mais simples para fluidos pseudoplásticos e dilatantes (OSTWALD, 1925; WAELE, 1923):

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.6)$$

onde  $K$  é o índice de consistência [ $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$ ] e  $n$  é o índice de comportamento do escoamento [adimensional].

A viscosidade aparente para este modelo é:

$$\eta_{ap} = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.7)$$

O valor de  $n$  determina o tipo de comportamento:

- $n < 1$ : comportamento pseudoplástico (*shear-thinning*)
- $n = 1$ : comportamento Newtoniano ( $K = \eta$ )
- $n > 1$ : comportamento dilatante (*shear-thickening*)

Embora amplamente utilizado devido à sua simplicidade, o modelo de Lei de Potência apresenta limitações importantes: não descreve a tensão de escoamento e prediz viscosidade infinita quando  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$  para fluidos pseudoplásticos, o que é fisicamente inconsistente (CHHABRA; RICHARDSON, 2008).

### 2.1.3.2 MODELO DE BINGHAM

O modelo de Bingham é o mais simples para fluidos viscoplásticos, assumindo comportamento Newtoniano após a superação da tensão de escoamento (BINGHAM, 1916):

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \dot{\gamma} \quad \text{para } |\tau| \geq \tau_0 \quad (2.8)$$

onde  $\tau_0$  é a tensão de escoamento [Pa] e  $\eta_p$  é a viscosidade plástica [Pa·s].

A viscosidade aparente é dada por:

$$\eta_{ap} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \eta_p \quad (2.9)$$

O modelo de Bingham é historicamente importante e ainda utilizado na indústria de petróleo como referência, porém não captura o comportamento pseudoplástico observado na maioria dos fluidos de perfuração em altas taxas de cisalhamento (BOURGOYNE JR. et al., 1986).

### 2.1.3.3 MODELO DE HERSCHEL-BULKLEY

O modelo de Herschel-Bulkley combina a tensão de escoamento do modelo de Bingham com o comportamento não-linear da Lei de Potência, sendo amplamente utilizado para fluidos de perfuração (HERSCHEL; BULKLEY, 1926):

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad \text{para } |\tau| \geq \tau_0 \quad (2.10)$$

onde  $\tau_0$  é a tensão de escoamento [Pa],  $K$  é o índice de consistência [Pa·s<sup>n</sup>] e  $n$  é o índice de comportamento [adimensional].

A viscosidade aparente é:

$$\eta_{ap} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.11)$$

O modelo de Herschel-Bulkley reduz-se ao modelo de Bingham quando  $n = 1$ , à Lei de Potência quando  $\tau_0 = 0$ , e ao modelo Newtoniano quando  $\tau_0 = 0$  e  $n = 1$ . Sua versatilidade o torna o modelo preferido para a descrição de fluidos de perfuração na indústria (BOURGOYNE JR. et al., 1986).

### 2.1.3.4 MODELO DE CARREAU

O modelo de Carreau foi desenvolvido para descrever o comportamento de polímeros fundidos e soluções poliméricas em uma ampla faixa de taxas de cisalhamento (CARREAU, 1972):

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (2.12)$$

onde:

- $\eta_0$  é a viscosidade no platô Newtoniano de baixa taxa de cisalhamento [Pa·s]
- $\eta_{\infty}$  é a viscosidade no platô Newtoniano de alta taxa de cisalhamento [Pa·s]
- $\lambda$  é o tempo de relaxação característico [s]
- $n$  é o índice de comportamento [adimensional]

O modelo de Carreau tem a vantagem de prever viscosidade finita tanto para  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$  quanto para  $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ , evitando as singularidades da Lei de Potência. É particularmente útil em simulações CFD onde a taxa de cisalhamento pode variar em várias ordens de magnitude dentro do domínio computacional (CHHABRA; RICHARDSON, 2008).

Uma variante comum é o modelo de Carreau-Yasuda, que inclui um parâmetro adicional para maior flexibilidade no ajuste da região de transição:

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})[1 + (\lambda\dot{\gamma})^a]^{\frac{n-1}{a}} \quad (2.13)$$

onde  $a$  é o parâmetro de Yasuda que controla a largura da região de transição.

## 2.2 TIXOTROPIA

A tixotropia é um fenômeno reológico caracterizado pela dependência temporal reversível das propriedades de um material. Segundo a definição moderna estabelecida pela norma DIN SPEC 91143-2 e aceita pela comunidade reológica, tixotropia é o comportamento no qual os parâmetros reológicos (como viscosidade) diminuem gradualmente até um valor limite sob carga mecânica constante, seguido pela recuperação completa e dependente do tempo do estado inicial após a redução ou remoção da carga (MEWIS; WAGNER, 2009; MEZGER, 2014).

### 2.2.1 MECANISMO FÍSICO DA TIXOTROPIA

O comportamento tixotrópico é associado a materiais que possuem microestrutura interna capaz de ser destruída por cisalhamento e reconstruída em repouso. Em fluidos de perfuração, essa microestrutura pode consistir de:

- Redes tridimensionais formadas por partículas argilosas (bentonita);
- Estruturas de emulsão água-em-óleo estabilizadas por tensoativos;
- Interações entre polímeros e partículas coloidais;
- Agregados de partículas densificantes (barita).

Quando o material é submetido a cisalhamento, a energia mecânica introduzida rompe as ligações e interações que mantêm a estrutura, resultando em diminuição da viscosidade. Quando o cisalhamento é reduzido ou cessado, o movimento Browniano e as forças coloidais promovem a reconstrução gradual da estrutura, aumentando progressivamente a viscosidade até o estado original (MEWIS; WAGNER, 2009).

### 2.2.2 CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA TIXOTROPIA

A quantificação da tixotropia pode ser realizada por diversos métodos experimentais, sendo o mais robusto o Teste de Tixotropia de Três Intervalos (3ITT, *Three Interval Thixotropy Test*), padronizado pela norma DIN SPEC 91143-2 (MEZGER, 2014).

O teste 3ITT consiste em três intervalos consecutivos com condições de cisalhamento controladas:

1. **Intervalo 1 (Referência):** O material é submetido a baixa taxa de cisalhamento (ou oscilação na região viscoelástica linear) por tempo suficiente para atingir o equilíbrio estrutural. A viscosidade (ou módulos  $G'$  e  $G''$ ) neste intervalo representa o estado de referência com estrutura completa.
2. **Intervalo 2 (Destruição):** Alta taxa de cisalhamento é aplicada para destruir a micro-estrutura do material. A duração deve ser suficiente para atingir o estado de equilíbrio destruído.
3. **Intervalo 3 (Recuperação):** A taxa de cisalhamento é reduzida ao valor do Intervalo 1. A evolução temporal da viscosidade é monitorada, revelando a cinética de recuperação estrutural.

Os parâmetros extraídos do teste 3ITT incluem:

- $\eta_0$ : viscosidade de referência (estrutura completa), obtida no final do Intervalo 1
- $\eta_\infty$ : viscosidade mínima (estrutura destruída), obtida no final do Intervalo 2
- $\Delta\eta = \eta_0 - \eta_\infty$ : amplitude tixotrópica

- Curva  $\eta(t)$  no Intervalo 3: cinética de recuperação
- Tempo característico de recuperação ( $\tau$ ): obtido por ajuste de modelos

### 2.2.3 MODELOS MATEMÁTICOS PARA TIXOTROPIA

A modelagem matemática da tixotropia baseia-se tipicamente na introdução de uma variável escalar  $\lambda$  (parâmetro estrutural) que quantifica o grau de estruturação do material, variando entre 0 (completamente destruído) e 1 (completamente estruturado) (MEWIS; WAGNER, 2009).

A viscosidade é então relacionada ao parâmetro estrutural por uma equação constitutiva:

$$\eta(t) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \cdot f(\lambda) \quad (2.14)$$

onde  $f(\lambda)$  é uma função que relaciona o parâmetro estrutural à viscosidade, geralmente assumida como linear:  $f(\lambda) = \lambda$ .

A evolução temporal do parâmetro estrutural é governada por uma equação cinética que balanceia os processos competitivos de construção (recuperação) e destruição (quebra):

$$\frac{d\lambda}{dt} = \underbrace{k_1(1 - \lambda)^a}_{\text{construção}} - \underbrace{k_2 \cdot \lambda^b \cdot \dot{\gamma}^m}_{\text{destruição}} \quad (2.15)$$

onde  $k_1$  e  $k_2$  são constantes cinéticas de construção e destruição, respectivamente, e  $a$ ,  $b$ ,  $m$  são expoentes que determinam a ordem das reações.

#### 2.2.3.1 MODELO DE MOORE (1959)

O modelo de Moore é uma das formulações mais simples, assumindo cinética de primeira ordem tanto para construção quanto para destruição (MOORE, 1959):

$$\frac{d\lambda}{dt} = k_1(1 - \lambda) - k_2 \cdot \lambda \cdot \dot{\gamma} \quad (2.16)$$

Para o Intervalo 3 do teste 3ITT, onde  $\dot{\gamma}$  é baixo e o termo de destruição pode ser negligenciado, a solução analítica é exponencial:

$$\lambda(t) = 1 - \exp(-k_1 \cdot t) \quad (2.17)$$

E a viscosidade evolui como:

$$\eta(t) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})[1 - \exp(-t/\tau)] \quad (2.18)$$

onde  $\tau = 1/k_1$  é o tempo característico de recuperação.

O tempo característico  $\tau$  corresponde ao tempo necessário para atingir 63,2% ( $1 - 1/e$ ) da recuperação total.

### 2.2.3.2 MODELO DE HOUSKA (1981)

O modelo de Houska descreve fluidos que apresentam simultaneamente tensão de escoamento, comportamento pseudoplástico e tixotropia, sendo particularmente adequado a fluidos de perfuração (HOUSKA, 1981). Neste modelo, a tensão cisalhante é decomposta em uma parcela viscoplástica do tipo Herschel-Bulkley e uma parcela dependente do estado de estruturação do material, representado pelo parâmetro estrutural  $\lambda$ , que varia entre 0 (estrutura completamente destruída) e 1 (estrutura totalmente construída). A tensão é dada por:

$$\tau = \tau_{y0} + \lambda \tau_{yd} + k \dot{\gamma}^n \quad (2.19)$$

onde  $\tau_{y0}$  é a tensão de escoamento do material completamente desestruturado,  $\tau_{yd}$  é o incremento de tensão de escoamento associado à estrutura,  $k$  é o índice de consistência e  $n$  é o índice de comportamento. Dessa forma, a tensão de escoamento efetiva do fluido, dada por  $\tau_{y0} + \lambda \tau_{yd}$ , aumenta à medida que a estrutura se reconstrói.

A dependência temporal é governada por uma equação cinética que equilibra a reconstrução da estrutura, em repouso ou sob baixo cisalhamento, e sua destruição, induzida pelo cisalhamento:

$$\frac{d\lambda}{dt} = a(1 - \lambda) - b\lambda \dot{\gamma}^m \quad (2.20)$$

onde  $a$  é a taxa de reconstrução da estrutura,  $b$  é a taxa de quebra e  $m$  é o expoente que pondera a influência da taxa de cisalhamento na destruição estrutural. Como  $\lambda$  evolui no tempo segundo a Equação 2.20, o modelo representa não apenas a resposta pseudoplástica instantânea, mas também a escala de tempo de recuperação da estrutura, característica essencial da tixotropia. Foi este o modelo adotado na descrição da fase contínua no presente trabalho.

### 2.2.3.3 MODELO DE SOUZA MENDES (2009)

O modelo de Souza Mendes propõe uma formulação bi-exponencial para capturar múltiplos mecanismos de recuperação que operam em escalas temporais distintas (MENDES, 2009):

$$\eta(t) = \eta_{\infty} + A \cdot (\eta_0 - \eta_{\infty})[1 - \exp(-t/\tau_1)] + (1 - A) \cdot (\eta_0 - \eta_{\infty})[1 - \exp(-t/\tau_2)] \quad (2.21)$$

onde  $\tau_1$  e  $\tau_2$  são os tempos característicos dos dois mecanismos e  $A$  é a fração de contribuição do primeiro mecanismo.

Este modelo é particularmente útil para fluidos de perfuração, onde múltiplos componentes (argila, polímero, emulsão) podem contribuir para a estrutura com cinéticas distintas.

#### 2.2.3.4 MODELO DE WEI (EXPONENCIAL ESTICADA)

O modelo de Wei utiliza a função exponencial esticada (também conhecida como função de Kohlrausch-Williams-Watts, KWW) para descrever distribuições de tempos de relaxação (WEI; SOLOMON; LARSON, 2018):

$$\eta(t) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})[1 - \exp(-(t/\tau)^{\beta})] \quad (2.22)$$

onde  $\beta$  é o expoente de estiramento ( $0 < \beta \leq 1$ ).

Quando  $\beta = 1$ , recupera-se o modelo de Moore. Valores de  $\beta < 1$  indicam distribuição de tempos de relaxação, com a recuperação sendo mais rápida inicialmente e mais lenta posteriormente. Este comportamento é frequentemente observado em sistemas coloidais complexos como fluidos de perfuração.

### 2.3 ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS

Os fluidos de perfuração são sistemas intrinsecamente multifásicos, contendo uma fase fluida contínua (base aquosa, oleosa ou sintética), partículas sólidas em suspensão (barita, calcita, cascalhos), e frequentemente uma fase líquida dispersa (gotículas de água em fluidos de base oleosa ou sintética). A modelagem adequada desses sistemas requer a consideração das interações entre as diferentes fases (PASSOS; FONTES; FREIRE, 2011; ZHANG; ZHANG; LI, 2011).

#### 2.3.1 ABORDAGENS DE MODELAGEM MULTIFÁSICA

Duas abordagens principais são empregadas na modelagem de escoamentos multifásicos:

**Abordagem Euler-Lagrange:** A fase contínua é tratada como um contínuo (Euleriana), enquanto a fase dispersa é rastreada como partículas individuais (Lagrangeana). Esta abordagem é adequada para sistemas com baixa fração volumétrica de partículas ( $\alpha_s < 10\%$ ) e permite o rastreamento detalhado de trajetórias individuais. Contudo, o custo computacional escala com o número de partículas, tornando-a proibitiva para sistemas concentrados (PASSOS; FONTES; FREIRE, 2011).

**Abordagem Euler-Euler:** Ambas as fases são tratadas como contínuos interpenetrantes, cada uma ocupando uma fração volumétrica do domínio. Esta abordagem é mais adequada para sistemas com alta concentração de partículas e será adotada neste trabalho devido às elevadas frações de sólidos típicas de fluidos de perfuração densificados (ZHANG; ZHANG; LI, 2011).

#### 2.3.2 MODELO EULER-EULER DE DUAS FASES

Na abordagem Euler-Euler, as equações de conservação são escritas para cada fase  $k$  (fluida  $f$  ou sólida  $s$ ), com a introdução da fração volumétrica  $\alpha_k$  como variável adicional.

### 2.3.2.1 CONSERVAÇÃO DA MASSA

A equação de continuidade para cada fase é:

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k) = 0 \quad (2.23)$$

onde  $\alpha_k$  é a fração volumétrica da fase  $k$ ,  $\rho_k$  é a massa específica da fase  $k$ , e  $\mathbf{u}_k$  é o vetor velocidade da fase  $k$ .

A restrição de saturação impõe:

$$\alpha_f + \alpha_s = 1 \quad (2.24)$$

### 2.3.2.2 CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO

A equação de conservação de quantidade de movimento para cada fase inclui termos de interação entre fases:

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k) = -\alpha_k \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_k \boldsymbol{\tau}_k) + \alpha_k \rho_k \mathbf{g} + \mathbf{M}_k \quad (2.25)$$

onde  $p$  é a pressão compartilhada entre as fases,  $\boldsymbol{\tau}_k$  é o tensor de tensões viscosas da fase  $k$ ,  $\mathbf{g}$  é a aceleração gravitacional, e  $\mathbf{M}_k$  representa as forças de interação entre fases.

### 2.3.3 FORÇAS DE INTERAÇÃO ENTRE FASES

O termo  $\mathbf{M}_k$  engloba diversas forças de interação, sendo a força de arrasto a mais significativa para suspensões de partículas ([PASSOS; FONTES; FREIRE, 2011](#)).

#### 2.3.3.1 FORÇA DE ARRASTO

A força de arrasto representa a resistência ao movimento relativo entre as fases:

$$\mathbf{M}_D = K_{fs}(\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_s) \quad (2.26)$$

onde  $K_{fs}$  é o coeficiente de troca de momento entre as fases, que depende do regime de escoamento e da fração de sólidos.

Para suspensões densas, o modelo de Gidaspow é frequentemente empregado, combinando a correlação de Ergun para baixas porosidades com a correlação de Wen e Yu para altas porosidades ([GIDASPOW, 1994](#)):

Para  $\alpha_f \leq 0.8$ :

$$K_{fs} = 150 \frac{\alpha_s^2 \mu_f}{\alpha_f d_s^2} + 1.75 \frac{\alpha_s \rho_f |\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_s|}{d_s} \quad (2.27)$$

Para  $\alpha_f > 0.8$ :

$$K_{fs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_f \rho_f |\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_s|}{d_s} \alpha_f^{-2.65} \quad (2.28)$$

onde  $d_s$  é o diâmetro das partículas e  $C_D$  é o coeficiente de arrasto de uma partícula isolada. No presente trabalho adotou-se a formulação de Gidaspow com esta combinação das correlações de Ergun e Wen-Yu, apropriada à faixa de fração de sólidos considerada, na qual a fase dispersa alterna entre regiões densas, próximas ao leito acumulado, e regiões diluídas, na suspensão.

### 2.3.3.2 OUTRAS FORÇAS

Dependendo das condições do escoamento, outras forças podem ser relevantes:

- **Força de massa virtual:** importante quando há aceleração relativa entre as fases
- **Força de sustentação (lift):** relevante em escoamentos com gradientes de velocidade
- **Força de dispersão turbulenta:** importante em escoamentos turbulentos

Para as condições típicas de reatores agitados com fluidos de perfuração, a força de arrasto é dominante e as demais podem ser negligenciadas em primeira aproximação (ZHANG; ZHANG; LI, 2011).

## 2.3.4 PROPRIEDADES DA FASE SÓLIDA

A modelagem da fase sólida como um contínuo requer a definição de propriedades efetivas, incluindo a viscosidade e a pressão de sólidos. Essas propriedades são obtidas a partir da teoria cinética dos escoamentos granulares, que trata as flutuações de velocidade das partículas de forma análoga ao movimento molecular em um gás, introduzindo a temperatura granular como medida da energia dessas flutuações (GIDASPOW, 1994).

### 2.3.4.1 PRESSÃO DE SÓLIDOS

A pressão de sólidos ( $p_s$ ) representa as forças de contato entre partículas em suspensões concentradas:

$$p_s = \alpha_s \rho_s \Theta_s + 2\rho_s(1 + e)\alpha_s^2 g_0 \Theta_s \quad (2.29)$$

onde  $\Theta_s$  é a temperatura granular (energia cinética das flutuações de velocidade das partículas),  $e$  é o coeficiente de restituição, e  $g_0$  é a função de distribuição radial.

### 2.3.4.2 VISCOSIDADE DE SÓLIDOS

A viscosidade efetiva da fase sólida inclui contribuições colisionais, cinéticas e friccionais:

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (2.30)$$

Para suspensões próximas ao empacotamento máximo, torna-se relevante a contribuição friccional, associada ao contato sustentado entre partículas. No presente trabalho, essa contribuição foi descrita pelo modelo de Johnson e Jackson ([JOHNSON; JACKSON, 1987](#)), que introduz uma pressão friccional ativada acima de uma fração de sólidos limite e um ângulo de fricção interna característico do material.

## 2.4 FUNDAMENTOS DE DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) é um ramo da mecânica dos fluidos que utiliza métodos numéricos e algoritmos computacionais para resolver problemas envolvendo escoamento de fluidos. A CFD permite a análise detalhada de campos de velocidade, pressão, temperatura e outras grandezas de interesse, fornecendo informações que seriam difíceis ou impossíveis de obter experimentalmente ([VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007](#); [FERZIGER; PERIĆ, 2002](#)).

### 2.4.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES

O escoamento de fluidos é governado pelas leis de conservação da massa, quantidade de movimento e energia. Para fluidos incompressíveis e isotérmicos, as duas primeiras são suficientes.

#### 2.4.1.1 EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

A conservação da massa para um fluido incompressível é expressa pela equação da continuidade:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.31)$$

que estabelece que o campo de velocidades deve ser solenoidal (divergente nulo).

#### 2.4.1.2 EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES

A conservação da quantidade de movimento é expressa pelas equações de Navier-Stokes. Para um fluido incompressível não-Newtoniano generalizado:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} \quad (2.32)$$

onde  $\rho$  é a massa específica,  $\mathbf{u}$  é o vetor velocidade,  $p$  é a pressão,  $\boldsymbol{\tau}$  é o tensor de tensões viscosas, e  $\mathbf{g}$  é a aceleração gravitacional.

Para fluidos não-Newtonianos, o tensor de tensões é relacionado ao tensor taxa de deformação por:

$$\boldsymbol{\tau} = 2\eta(\dot{\gamma})\mathbf{D} \quad (2.33)$$

onde  $\eta(\dot{\gamma})$  é a viscosidade aparente (função da taxa de cisalhamento) e  $\mathbf{D}$  é o tensor taxa de deformação:

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \quad (2.34)$$

A magnitude da taxa de cisalhamento é calculada como:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2\mathbf{D} : \mathbf{D}} \quad (2.35)$$

## 2.4.2 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

O Método dos Volumes Finitos (MVF) é a técnica de discretização predominante em CFD comercial e acadêmica, sendo empregado pelo OpenFOAM. O método baseia-se na integração das equações de conservação sobre volumes de controle discretos (células da malha) (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007; FERZIGER; PERIĆ, 2002).

Para uma variável genérica  $\phi$ , a equação de transporte na forma integral é:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_S \rho \phi \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dS = \oint_S \Gamma \nabla \phi \cdot \mathbf{n} dS + \int_V S_\phi dV \quad (2.36)$$

onde o primeiro termo é a taxa de variação temporal, o segundo é o fluxo convectivo através das faces, o terceiro é o fluxo difusivo, e o quarto é o termo fonte.

As principais vantagens do MVF incluem:

- Conservação garantida em nível discreto
- Aplicabilidade a malhas não-estruturadas e geometrias complexas
- Tratamento natural de condições de contorno

### 2.4.3 ACOPLAMENTO PRESSÃO-VELOCIDADE

Para escoamentos incompressíveis, a pressão não aparece explicitamente na equação da continuidade, requerendo algoritmos especiais de acoplamento. Os mais utilizados são:

**SIMPLE** (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*): algoritmo iterativo que resolve sequencialmente as equações de momento e uma equação de correção de pressão derivada da continuidade (PATANKAR; SPALDING, 1972).

**PISO** (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*): extensão do SIMPLE com correções adicionais de pressão, mais adequado para simulações transientes (ISSA, 1986).

**PIMPLE**: combinação de PISO e SIMPLE, permitindo maior flexibilidade no controle de convergência e passo de tempo (OpenFOAM Foundation, 2024).

### 2.4.4 MODELAGEM DE ROTAÇÃO: MODELO MRF

A simulação de reatores agitados requer o tratamento do movimento rotativo do impelidor. Duas abordagens principais são empregadas:

**Malha Deslizante** (*Sliding Mesh*): a região ao redor do impelidor rotaciona fisicamente, com interfaces deslizantes conectando-a à região estacionária. Esta abordagem captura os efeitos transientes da passagem das pás, mas é computacionalmente custosa (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

**Modelo de Referência Múltipla (MRF)**: aproximação de estado estacionário onde a região do impelidor é tratada em um referencial rotativo, enquanto o restante do domínio permanece em referencial inercial (LUO; ISSA; GOSMAN, 1994).

No modelo MRF, as equações de movimento no referencial rotativo incluem termos adicionais de força centrífuga e de Coriolis:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}_r}{\partial t} + \mathbf{u}_r \cdot \nabla \mathbf{u}_r + 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u}_r + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2.37)$$

onde  $\mathbf{u}_r$  é a velocidade no referencial rotativo,  $\boldsymbol{\omega}$  é o vetor velocidade angular, e  $\mathbf{r}$  é o vetor posição.

Um aspecto essencial do tratamento por MRF diz respeito às condições de contorno das paredes móveis. As paredes do impelidor, contidas na zona rotativa, são impostas como paredes de não deslizamento (*no-slip*), e o seu movimento é contabilizado exclusivamente pela rotação do referencial definida na zona MRF. A imposição adicional de uma velocidade rotativa explícita a essas paredes seria redundante e inconsistente com o referencial rotativo, podendo introduzir erros ou instabilidades na solução. Dessa forma, a rotação é especificada em um único local, garantindo a coerência entre o movimento da parede e o do referencial.

O modelo MRF é uma aproximação de “fotografia congelada” do escoamento, adequada quando os efeitos transientes da passagem das pás não são o foco principal da análise. Para reatores com múltiplos impelidores ou geometrias complexas, o custo computacional reduzido torna o MRF a escolha preferencial para estudos paramétricos (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

## 2.5 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Esta seção descreve as ferramentas computacionais empregadas neste trabalho para a geração de geometria, criação de malha, simulação numérica e pós-processamento de resultados.

### 2.5.1 OPENFOAM

O OpenFOAM (*Open Source Field Operation and Manipulation*) é uma biblioteca de código aberto em C++ para a solução numérica de problemas de mecânica do contínuo, com ênfase em dinâmica dos fluidos (OpenFOAM Foundation, 2024). Desenvolvido originalmente pelo Imperial College London e atualmente mantido pela OpenFOAM Foundation e pela ESI-OpenCFD, o software oferece:

- Ampla gama de *solvers* para diferentes classes de problemas (incompressível, compressível, multifásico, combustão, etc.);
- Biblioteca extensiva de modelos físicos (turbulência, reologia, transferência de calor);
- Arquitetura modular que facilita a implementação de novos modelos;
- Utilitários para geração e manipulação de malhas;
- Ferramentas de pré e pós-processamento;
- Código fonte aberto, permitindo modificações e customizações.

A estrutura de um caso OpenFOAM é organizada em diretórios:

- 0/: condições iniciais e de contorno para cada variável;
- constant/: propriedades físicas (transportProperties), malha (polyMesh/) e configurações de modelos;
- system/: controle da simulação (controlDict), esquemas numéricos (fvSchemes) e configuração dos *solvers* lineares (fvSolution).

Para este trabalho, os principais *solvers* e utilitários incluem:

- `multiphaseEulerFoam`: *solver* para escoamentos multifásicos na abordagem Euler-Euler, empregado neste trabalho;
- `gmshToFoam`: utilitário de conversão de malhas geradas no Gmsh para o formato do OpenFOAM;
- `topoSet`: utilitário para a definição de zonas celulares, empregado na criação da zona rotativa do Modelo de Referência Múltipla;
- `setFields`: utilitário para a inicialização não uniforme de campos, empregado na deposição inicial da fase sólida;
- `decomposePar` e `reconstructPar`: utilitários para a decomposição do domínio no processamento paralelo e a posterior reconstrução dos resultados;
- `checkMesh`: verificador de qualidade de malha.

A configuração das fases e dos modelos constitutivos no `multiphaseEulerFoam` é realizada por meio do dicionário `phaseProperties`, que define as fases, o modelo de arrasto e os fechamentos da fase sólida. A arquitetura modular do OpenFOAM permite, ademais, a implementação de modelos não disponíveis nativamente, como o modelo tixotrópico de Houska adotado neste trabalho, por meio de bibliotecas próprias acopladas ao *solver*.

### 2.5.2 GMSH

O Gmsh é um gerador de malhas de elementos finitos tridimensional com capacidades integradas de pré e pós-processamento (GEUZAINÉ; REMACLE, 2009). Suas principais características incluem:

- Definição paramétrica de geometrias através de arquivo texto ou API Python;
- Operações booleanas para construção de geometrias complexas;
- Geração de malhas não-estruturadas (tetraédrica, hexaédrica, prismática);
- Controle refinado do tamanho de elementos;
- Exportação para múltiplos formatos (STL, MSH, etc.).

A capacidade de geração paramétrica de geometrias é particularmente valiosa para este trabalho, permitindo a variação sistemática de dimensões do rotor através de *scripts*. A exportação para formato STL fornece a interface com as ferramentas de malha do OpenFOAM.

O fluxo de trabalho típico com Gmsh envolve:

1. Definição de pontos, linhas, superfícies e volumes através de comandos geométricos;
2. Aplicação de operações booleanas (união, interseção, subtração);
3. Definição de grupos físicos para identificação de regiões e condições de contorno;
4. Geração da malha superficial (para exportação STL) ou volumétrica;
5. Exportação do arquivo para uso posterior.

### 2.5.3 PARAVIEW

O ParaView é uma aplicação de código aberto para visualização e análise de dados científicos, desenvolvida pelo Sandia National Laboratories e Kitware Inc. ([Kitware Inc., 2024](#)). Suas capacidades incluem:

- Visualização tridimensional de campos escalares e vetoriais;
- Extração de isosuperfícies, linhas de corrente e planos de corte;
- Cálculo de grandezas derivadas (vorticidade, critério Q, etc.);
- Geração de gráficos e animações;
- Processamento em paralelo para grandes conjuntos de dados;
- *Scripting* em Python para automação de análises.

O ParaView lê nativamente os formatos de saída do OpenFOAM através do leitor `OpenFOAMReader`, permitindo a visualização direta dos resultados das simulações.

Para este trabalho, o ParaView será utilizado para:

- Visualização de campos de velocidade, pressão e taxa de cisalhamento;
- Extração de perfis ao longo de linhas e superfícies;
- Análise da distribuição espacial de grandezas;
- Geração de figuras e animações para documentação;
- Comparação quantitativa entre diferentes configurações de impelidor.

## 2.5.4 INTEGRAÇÃO DO FLUXO DE TRABALHO

A integração das ferramentas descritas em um fluxo de trabalho automatizado é essencial para a realização de estudos paramétricos eficientes. A automação será implementada através de *scripts* Bash e Python que executam sequencialmente:

1. Geração paramétrica da geometria e da malha tetraédrica (Python/Gmsh);
2. Conversão da malha para o formato do OpenFOAM (gmshToFoam);
3. Ajuste dos contornos e verificação da qualidade da malha (checkMesh);
4. Criação da zona rotativa do Modelo de Referência Múltipla (topoSet);
5. Inicialização dos campos, com deposição da fase sólida (setFields);
6. Decomposição do domínio para processamento paralelo (decomposePar);
7. Execução da simulação (multiphaseEulerFoam);
8. Reconstrução dos resultados (reconstructPar);
9. Pós-processamento e extração de dados (ParaView/Python).

Este fluxo de trabalho permite a execução sistemática de múltiplas simulações com variação paramétrica, facilitando a otimização das configurações do rotor.

## 3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho estrutura-se em dois eixos complementares. O primeiro, de natureza experimental, destina-se à obtenção dos parâmetros físicos que alimentam a simulação: a concentração de sólidos, a massa específica das fases e os parâmetros reológicos e tixotrópicos do fluido de perfuração. Esses dados não constituem um fim em si mesmos no presente trabalho, mas são condição necessária para que o modelo computacional represente um fluido real, e não uma abstração arbitrária. O segundo eixo, de natureza computacional, compreende a concepção, a construção e a verificação do modelo CFD propriamente dito, desenvolvido do zero em *software* livre e estruturado de forma paramétrica e automatizada.

A ordem de apresentação reflete a dependência lógica entre as etapas: primeiro caracteriza-se o material, depois constrói-se o modelo que o representa.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO FLUIDO

O fluido de perfuração empregado neste estudo foi caracterizado experimentalmente com o objetivo de determinar as propriedades requeridas como dados de entrada da simulação numérica. Três grandezas são indispensáveis à formulação Euler-Euler adotada: a fração volumétrica de sólidos, que define a distribuição inicial das fases; as massas específicas das fases contínua e dispersa, que governam o empuxo e a sedimentação; e os parâmetros do modelo reológico tixotrópico, que descrevem a resposta do fluido ao cisalhamento imposto pelo impelidor. Cada uma dessas grandezas foi obtida por um procedimento experimental específico, descrito a seguir.

#### 3.1.1 O FLUIDO DE PERFURAÇÃO ESTUDADO

O fluido de perfuração empregado neste trabalho é um fluido sintético de base olefínica, formulado como uma emulsão inversa do tipo água em óleo, na qual a fase contínua orgânica é constituída por olefina linear e a fase aquosa dispersa por salmoura estabilizada por emulsificantes. Fluidos dessa natureza combinam o desempenho técnico dos fluidos de base oleosa com um perfil ambiental mais favorável, o que motiva o seu emprego em poços de alta complexidade, como os do pré-sal brasileiro.

O fluido foi preparado em laboratório segundo a formulação apresentada na Tabela 1, com razão óleo/água de aproximadamente 60/40. A fase aquosa, constituída por salmoura de cloreto de sódio, foi emulsionada na fase contínua olefínica com o auxílio de emulsificantes, sendo em seguida incorporados o agente adensante e os demais aditivos até a obtenção de uma dispersão estável. A homogeneização na fabricação foi realizada em misturador Silverson L5MA,

a 10.000 rpm. Antes dos ensaios, a amostra foi novamente homogeneizada, de modo a assegurar a uniformidade da dispersão dos sólidos e a reprodutibilidade das medidas.

A formulação do fluido, com os componentes, suas funções e as respectivas concentrações, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Formulação do fluido de perfuração de base olefínica empregado neste trabalho. As concentrações são expressas em unidades de campo (lb/bbl e bbl/bbl).

| <b>Componente (função)</b>             | <b>Concentração</b> |
|----------------------------------------|---------------------|
| Olefina interna C15–C18 (fluido base)  | 0,58 bbl/bbl        |
| Emulsificante primário                 | 12 lb/bbl           |
| Emulsificante secundário               | 3 lb/bbl            |
| Cal hidratada (alcalinizante)          | 9 lb/bbl            |
| Controlador de filtrado                | 2 lb/bbl            |
| Viscosificante                         | 1,5 lb/bbl          |
| Modificador reológico                  | 0,4 lb/bbl          |
| Salmoura de NaCl (fase aquosa interna) | 0,39 bbl/bbl        |
| Agente obturante (calcário)            | 30 lb/bbl           |
| Adensante (baritina)                   | 40 lb/bbl           |

Fonte: Autor.

### 3.1.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS POR RETORTA

A composição volumétrica do fluido de perfuração foi determinada por meio de ensaio de retorta, técnica padrão na indústria de petróleo para a quantificação das frações de líquido e de sólidos presentes na lama. O procedimento consiste em submeter um volume conhecido de fluido a aquecimento controlado em uma câmara selada, promovendo a vaporização das fases líquidas, que são posteriormente condensadas e coletadas em uma proveta graduada. Por diferença entre o volume inicial da amostra e o volume de líquido recuperado, obtém-se o volume de sólidos retidos na retorta.

O ensaio fornece, portanto, a fração volumétrica de sólidos do fluido, grandeza empregada diretamente como condição inicial do campo de fração volumétrica da fase dispersa na simulação. Trata-se de um dado essencial, uma vez que a quantidade de material particulado presente condiciona tanto o comportamento de sedimentação quanto a intensidade do acoplamento entre as fases.

Empregou-se um volume de amostra de 10 mL, previamente homogeneizado conforme descrito na Seção 3.1.1. O conjunto de retorta empregado no ensaio é apresentado na Figura 7.

O diâmetro médio das partículas sólidas, requerido pela formulação Euler-Euler, foi determinado por difração a laser em analisador de tamanho de partículas Malvern Mastersizer 2000, a partir dos sólidos recuperados no ensaio de retorta. A análise foi conduzida por via úmida, em água, sob agitação contínua e dispersão ultrassônica, de modo a promover a desaglomeração das partículas e a obtenção de uma suspensão homogênea.

Figura 7 – Conjunto de retorta empregado na determinação do teor de sólidos do fluido de perfuração.



Fonte: Autor.

### 3.1.3 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA POR PICNOMETRIA A GÁS

As massas específicas foram determinadas por picnometria de deslocamento de gás hélio, empregando-se o picnômetro Micromeritics AccuPyc 1330 (Figura 8). O princípio de medida baseia-se na lei de Boyle: a amostra é acondicionada em uma câmara de volume conhecido, que é pressurizada com hélio e posteriormente expandida para uma câmara de referência, também de volume conhecido. A partir da variação de pressão registrada, determina-se o volume efetivamente ocupado pela amostra, e a razão entre a massa previamente pesada e esse volume fornece a massa específica.

A escolha do hélio decorre de seu reduzido diâmetro molecular e de seu comportamento próximo ao de um gás ideal, o que lhe permite penetrar em poros e interstícios, resultando em uma medida de massa específica real e não aparente. O ensaio foi conduzido com múltiplas purgas e repetições, adotando-se como resultado a média das medidas convergidas.

Os valores obtidos alimentam diretamente as propriedades das duas fases no modelo Euler-Euler, sendo determinantes para a diferença de massa específica entre fluido e sólido, que é a força motriz da sedimentação e, por consequência, da formação de regiões de acúmulo de material particulado.

### 3.1.4 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA E TIXOTRÓPICA

A caracterização reológica do fluido de perfuração foi conduzida em reômetro rotacional Anton Paar MCR 102e, equipado com geometria de cilindros concêntricos CC27, e compreendeu dois ensaios complementares, dos quais se extraem, respectivamente, a componente de equilíbrio

Figura 8 – Picnômetro de gás hélio Micromeritics AccuPyc 1330 utilizado na determinação da massa específica.



Fonte: Autor.

e a componente transiente do modelo reológico: um ensaio de curva de fluxo e um ensaio de tixotropia em três intervalos de tempo.

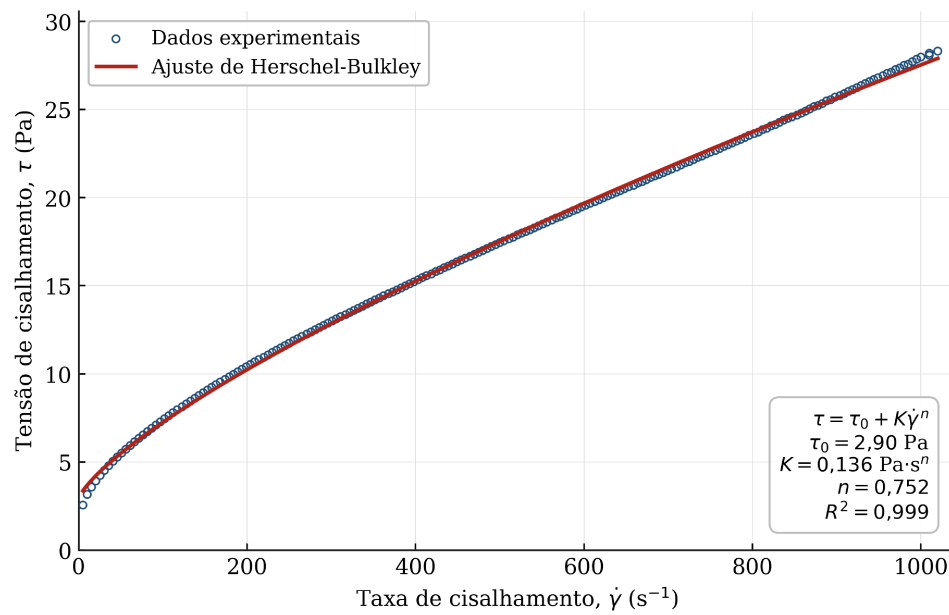
#### 3.1.4.1 CURVA DE FLUXO

No ensaio de curva de fluxo, a tensão de cisalhamento é medida em função de uma taxa de cisalhamento crescente, em regime estacionário, caracterizando o comportamento de equilíbrio do fluido. O ensaio foi conduzido à temperatura de 30 °C, com a taxa de cisalhamento variando de 5,11 a 1021 s<sup>-1</sup>, precedido de uma etapa de pré-cisalhamento destinada a uniformizar o histórico mecânico da amostra. A curva obtida, apresentada na Figura 9, foi ajustada ao modelo de Herschel-Bulkley por regressão não linear pelo método dos mínimos quadrados. O ajuste mostrou-se excelente, com coeficiente de determinação de 0,999, fornecendo uma tensão de escoamento de 2,90 Pa, um índice de consistência de 0,136 Pa·s<sup>n</sup> e um índice de comportamento de 0,752. Esses valores confirmam o caráter pseudoplástico e de tensão de escoamento do fluido e constituem os parâmetros viscoplásticos de equilíbrio empregados no modelo de Houska: a tensão de escoamento do material, o índice de consistência e o índice de comportamento.

#### 3.1.4.2 ENSAIO DE TIXOTROPIA EM TRÊS INTERVALOS DE TEMPO (3ITT)

A componente tixotrópica do modelo, responsável pela dependência temporal, foi obtida por meio do ensaio de tixotropia em três intervalos de tempo (3ITT, *Three Interval Thixotropy Test*), na modalidade rotacional-rotacional-rotacional (Rot-Rot-Rot). O ensaio é especialmente

Figura 9 – Curva de fluxo do fluido de perfuração e respectivo ajuste do modelo de Herschel-Bulkley.



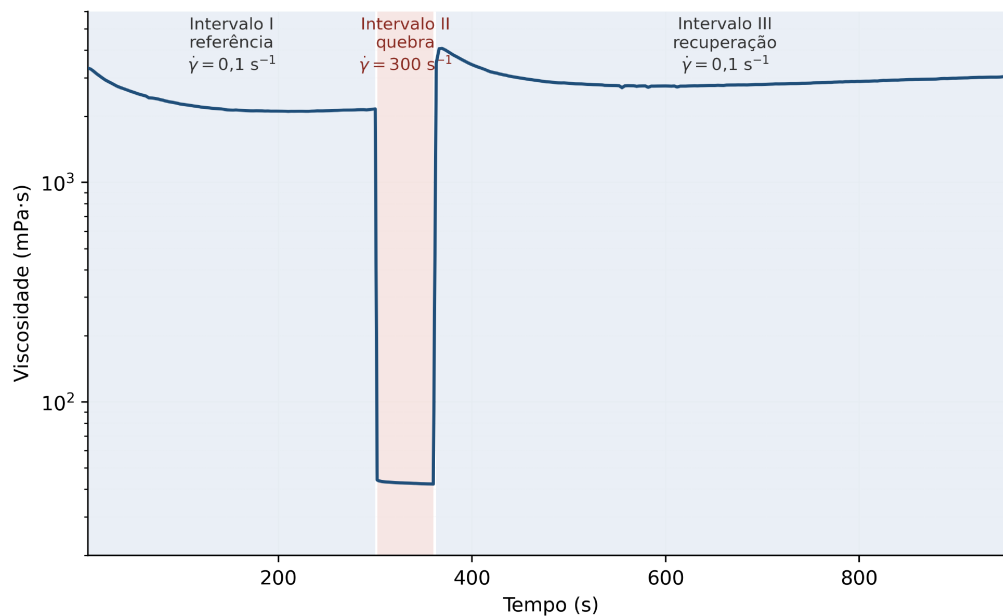
Fonte: Autor.

adequado à caracterização de fluidos tixotrópicos, pois permite separar, no tempo, a destruição e a reconstrução da estrutura interna do material.

O protocolo compreende três intervalos consecutivos. No primeiro, a amostra é submetida a uma taxa de cisalhamento baixa, de  $0,1 \text{ s}^{-1}$ , de modo a estabelecer um estado de referência com a estrutura essencialmente preservada. No segundo, aplica-se uma taxa de cisalhamento elevada, de  $300 \text{ s}^{-1}$ , suficiente para promover a quebra da estrutura, observando-se a queda da viscosidade aparente ao longo do tempo. No terceiro, retorna-se à taxa de cisalhamento baixa do primeiro intervalo, de  $0,1 \text{ s}^{-1}$ , e acompanha-se a recuperação progressiva da viscosidade, que reflete a reconstrução da estrutura interna. O ensaio foi conduzido à temperatura de  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , com a mesma geometria de medição empregada no ensaio de curva de fluxo, em triplicata. Os intervalos tiveram duração aproximada de 300 s (referência), 60 s (quebra) e 600 s (recuperação). A Figura 10 apresenta a resposta transiente da viscosidade ao longo dos três intervalos, evidenciando a acentuada queda no intervalo de alto cisalhamento e a subsequente recuperação em direção ao patamar de referência, comportamento característico de um fluido tixotrópico.

O ajuste conjunto das respostas de equilíbrio e transiente ao modelo de Houska, descrito na Seção 2.2.3.2, fornece o conjunto completo de parâmetros necessários à simulação: a tensão de escoamento do material desestruturado, o incremento de tensão associado à estrutura, o índice de consistência, o índice de comportamento e as constantes cinéticas de reconstrução e de quebra da estrutura, com o respectivo expoente da taxa de cisalhamento. Ressalta-se que, sem o ensaio transiente, a componente tixotrópica do modelo não poderia ser parametrizada, e o fluido teria de ser tratado como puramente viscoplástico, o que suprimiria justamente a dependência temporal que se pretende representar.

Figura 10 – Resposta transiente da viscosidade no ensaio de tixotropia em três intervalos de tempo (3ITT), evidenciando a quebra e a subsequente recuperação estrutural do fluido. Repetição representativa do ensaio realizado em triplicata.



Fonte: Autor.

### 3.1.5 SÍNTESE DOS DADOS DE ENTRADA

Os resultados dos três ensaios descritos consolidam o conjunto de propriedades físicas empregadas na simulação, sintetizadas na Tabela 2. Esses valores constituem a interface entre a caracterização experimental e o modelo computacional: são eles que asseguram que o escoamento simulado corresponde ao de um fluido de perfuração real.

Tabela 2 – Propriedades físicas do fluido e da fase sólida empregadas na simulação.

| Propriedade                                      | Valor                 | Unidade                        |
|--------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Massa específica da fase fluida                  | 1200                  | kg m <sup>-3</sup>             |
| Massa específica da fase sólida                  | 2612                  | kg m <sup>-3</sup>             |
| Diâmetro médio das partículas                    | 50                    | μm                             |
| Fração volumétrica inicial de sólidos            | 0,15                  | –                              |
| Índice de consistência, $k$                      | 0,136                 | Pa s <sup><math>n</math></sup> |
| Índice de comportamento, $n$                     | 0,752                 | –                              |
| Tensão de escoamento desestruturada, $\tau_{y0}$ | 2,90                  | Pa                             |
| Incremento estrutural de tensão, $\tau_{yd}$     | 0,46                  | Pa                             |
| Taxa de reconstrução estrutural, $a$             | $2,03 \times 10^{-2}$ | s <sup>-1</sup>                |
| Taxa de quebra estrutural, $b$                   | $1,63 \times 10^{-4}$ | –                              |
| Expoente de quebra, $m$                          | 1,0                   | –                              |
| Viscosidade a cisalhamento infinito              | $1,2 \times 10^{-3}$  | Pa s                           |

Fonte: Autor.

## 3.2 CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

Esta seção descreve a concepção e a construção do modelo CFD, desenvolvido integralmente do zero na plataforma livre OpenFOAM, versão 9. O objetivo não foi apenas obter uma solução para uma configuração particular, mas estabelecer um arcabouço numericamente estável, parametrizável e reproduzível, capaz de sustentar estudos futuros de otimização geométrica e operacional de células de envelhecimento.

### 3.2.1 ESTRATÉGIA DE CONSTRUÇÃO INCREMENTAL

A construção do modelo seguiu uma estratégia deliberadamente incremental, conforme o fluxograma apresentado na Figura 6. Em vez de acoplar simultaneamente todos os fenômenos de interesse, cada camada de complexidade física foi incorporada e verificada isoladamente, apenas avançando para a etapa seguinte após a obtenção de uma solução estável e fisicamente coerente.

A primeira etapa consistiu na geração da malha e na implementação da reologia não-Newtoniana, partindo do modelo viscoplástico de Herschel-Bulkley. A segunda incorporou a rotação do impelidor por meio do Modelo de Referência Múltipla, ainda em regime monofásico. A terceira introduziu a modelagem multifásica Euler-Euler, com o acoplamento sólido-líquido. A quarta e última incorporou a tixotropia por meio do modelo estrutural de Houska.

Essa progressão não é meramente organizacional: ela é uma decisão metodológica fundamental. Modelos multifásicos com reologia não-linear e rotação acoplada apresentam elevado potencial de instabilidade numérica, e a superposição simultânea de todos esses fenômenos torna praticamente impossível a atribuição da causa de uma eventual divergência. Ao isolar cada camada, garante-se que qualquer instabilidade observada seja atribuível ao fenômeno recém-introduzido, o que constitui uma prática recomendada na construção de modelos CFD complexos.

### 3.2.2 GEOMETRIA PARAMÉTRICA

O domínio computacional reproduz a célula de envelhecimento dotada de impelidor, constituída por um vaso cilíndrico agitado por uma turbina de três pás inclinadas a  $45^\circ$ , montada centralmente. As dimensões principais estão listadas na Tabela 3.

A geometria foi construída no software livre Gmsh, empregando-se o núcleo geométrico OpenCASCADE, e é integralmente definida por um arquivo de script no qual toda dimensão característica é declarada como variável. Essa parametrização é o alicerce do arcabouço proposto: a alteração de qualquer dimensão, como a folga em relação ao fundo, o ângulo das pás ou o diâmetro do impelidor, requer apenas a modificação do valor da variável correspondente, sendo a geometria e a malha regeneradas automaticamente, sem qualquer intervenção manual.

Tabela 3 – Dimensões geométricas da célula de envelhecimento e do impelidor.

| Parâmetro                    | Valor | Unidade |
|------------------------------|-------|---------|
| Diâmetro interno do vaso     | 140   | mm      |
| Altura do vaso               | 220   | mm      |
| Diâmetro do impelidor        | 60,3  | mm      |
| Número de pás                | 3     | –       |
| Ângulo de inclinação das pás | 45    | °       |
| Altura da pá                 | 52    | mm      |
| Espessura da pá              | 2     | mm      |
| Diâmetro do eixo             | 6,3   | mm      |
| Folga em relação ao fundo    | 30    | mm      |

Fonte: Autor.

A construção do domínio fluido segue uma sequência específica de operações booleanas. Primeiro, o volume do impelidor é montado pela união do eixo com as pás; em seguida, esse volume é subtraído do cilindro do vaso, de modo que o impelidor seja tratado como um sólido interno e não como região fluida; por fim, aplica-se a fragmentação booleana para assegurar a conformidade topológica entre as superfícies resultantes, garantindo a conectividade da malha. Verificou-se que a ordem dessas operações é crítica: sua alteração compromete a conectividade do domínio. Adicionalmente, a base das pás foi definida de modo a apresentar uma pequena sobreposição com o cubo do impelidor, evitando-se o contato meramente tangencial entre superfícies, que gera falhas de robustez na etapa de tetraedrização. A Figura 11 apresenta a geometria completa da célula, e a Figura 12 detalha o impelidor.

### 3.2.3 GERAÇÃO E VERIFICAÇÃO DA MALHA

A discretização espacial foi realizada por malha tetraédrica não estruturada, gerada no Gmsh e convertida ao formato do OpenFOAM pelo utilitário `gmshToFoam`. A opção pela malha tetraédrica decorre da complexidade geométrica do impelidor, com pás inclinadas e superfícies não alinhadas aos eixos coordenados, que inviabilizaria uma discretização hexaédrica estruturada sem esforço desproporcional.

O tamanho local dos elementos não é uniforme, mas controlado por um campo de dimensionamento de fundo, composto por dois mecanismos de refinamento combinados. O primeiro é um refinamento por distância às superfícies do impelidor: o tamanho característico do elemento cresce progressivamente de 2 mm, junto à superfície das pás e do eixo, até 6 mm, a uma distância de 15 mm dessas superfícies, concentrando resolução onde os gradientes de velocidade são mais intensos. O segundo é um refinamento por região, na forma de uma caixa que envolve a zona do impelidor, impondo elementos de 4 mm em seu interior e de 7 mm no exterior. O tamanho efetivo em cada ponto é dado pelo mínimo entre os dois campos, e o comprimento característico global foi limitado entre um mínimo de 2 mm e um máximo de 7 mm. Não se prescreveu uma taxa de crescimento fixa; a transição de tamanhos é governada pelos campos

Figura 11 – Geometria da célula de envelhecimento: vaso cilíndrico com o impelidor de pás inclinadas montado centralmente.



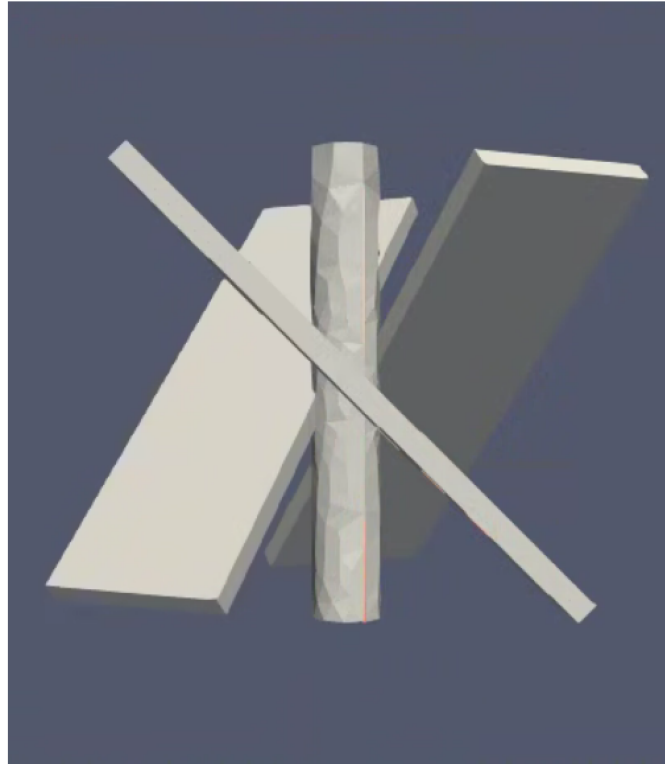
Fonte: Autor.

de distância e de região descritos. Ao final da geração, aplicou-se uma etapa de otimização da malha, com vistas à melhoria da qualidade dos elementos.

A malha de referência resultante contém 52.535 células. Para o estudo de independência de malha, geraram-se, pela variação do campo de dimensionamento, uma malha mais grosseira, com 26.485 células, e uma malha mais refinada, com 224.897 células. Após a conversão, os contornos correspondentes ao impelidor e às paredes do vaso foram convertidos ao tipo parede, requisito para a correta imposição das condições de contorno viscosas.

A qualidade da malha foi verificada com o utilitário *checkMesh*, que avalia critérios como não ortogonalidade, assimetria, razão de aspecto e existência de células degeneradas, assegurando a sanidade geométrica da discretização e, por consequência, a estabilidade dos esquemas numéricos. Distingue-se, contudo, a verificação de qualidade da verificação de independência de malha: a primeira atesta que a discretização é geometricamente sã; a segunda, apresentada no Capítulo de Resultados, estabelece que a solução obtida não depende do refinamento adotado.

Figura 12 – Detalhe do impelidor de três pás inclinadas a 45°.



Fonte: Autor.

### 3.2.4 MODELAGEM MULTIFÁSICA E FECHAMENTOS CONSTITUTIVOS

O escoamento foi resolvido pelo *solver* `multiphaseEulerFoam`, que implementa a formulação Euler-Euler descrita na Seção 2.4, tratando a fase fluida contínua e a fase sólida dispersa como meios interpenetrantes. Foram consideradas duas fases: a fase contínua, correspondente ao fluido de perfuração, e a fase dispersa, correspondente às partículas sólidas, com diâmetro médio de 50  $\mu\text{m}$ .

O acoplamento entre as fases foi estabelecido pela força de arrasto, adotando-se o modelo de Gidaspow, que combina a correlação de Ergun no regime denso com a correlação de Wen e Yu no regime diluído, conforme apresentado na Seção 2.3.3.1. Essa escolha justifica-se pela coexistência, no domínio, de regiões densas, junto ao leito acumulado no fundo do vaso, e de regiões diluídas, no seio da suspensão. As demais forças interfaciais foram desprezadas em primeira aproximação, uma vez que, nas condições consideradas, o arrasto é o mecanismo dominante de troca de quantidade de movimento.

A fase sólida foi fechada pela teoria cinética dos escoamentos granulares, adotando-se a formulação de Gidaspow para a viscosidade e a condutividade granulares. Para a contribuição friccional, relevante nas regiões próximas ao empacotamento, empregou-se o modelo de Johnson e Jackson. Os parâmetros adotados foram: coeficiente de restituição de 0,8; ângulo de fricção

interna de  $28,5^\circ$ ; fração volumétrica de empacotamento máximo de 0,62; e fração volumétrica limite para a ativação do atrito de 0,5.

A fase contínua foi descrita pelo modelo tixotrópico de Houska, implementado como biblioteca própria e acoplada ao *solver*. Diferentemente de um modelo generalizado newtoniano, no qual a viscosidade responde instantaneamente à taxa de cisalhamento local, o modelo implementado transporta o parâmetro estrutural  $\lambda$  como um campo que evolui no tempo, segundo a equação cinética apresentada na Seção 2.2.3.2. Essa distinção é determinante para o objetivo do trabalho: apenas com a evolução temporal da estrutura é possível representar a reconstrução do gel nas regiões de baixo cisalhamento e, portanto, a persistência de regiões estagnadas, e não apenas a sua ocorrência instantânea.

### 3.2.5 MODELAGEM DA ROTAÇÃO E CONDIÇÕES DE CONTORNO

A rotação do impelidor foi representada pelo Modelo de Referência Múltipla (MRF), descrito na Seção 2.4.4. No aparato físico, essa rotação é promovida por um motor de passos do tipo Nema; na simulação, ela é contabilizada exclusivamente pelo referencial rotativo da zona MRF. Definiu-se, por meio do utilitário `topoSet`, uma zona de células cilíndrica envolvendo o impelidor, à qual se aplicam os termos de Coriolis e centrífugo. O eixo de rotação foi orientado segundo a direção vertical. A velocidade angular nominal foi fixada em 150 rpm, correspondente a aproximadamente  $15,708 \text{ rad s}^{-1}$  e a uma velocidade periférica das pás de cerca de  $0,47 \text{ m s}^{-1}$ , esta última adotada como escala característica de velocidade do problema. Esse valor foi imposto por meio de uma tabela temporal, com rampa linear partindo do repouso e atingindo a rotação nominal ao final de cinco segundos, permanecendo constante em seguida. A adoção de uma rampa, em vez da imposição abrupta da rotação nominal, é uma medida deliberada de estabilização numérica: a partida instantânea de um fluido com tensão de escoamento gera gradientes de pressão e de velocidade excessivamente severos, comprometendo a convergência nos primeiros passos de tempo.

A escolha do Modelo de Referência Múltipla, em detrimento de uma formulação de malha deslizante (*sliding mesh*), foi deliberada e apoia-se na natureza do fenômeno investigado. Na abordagem de malha deslizante, a malha da zona do impelidor efetivamente rotaciona a cada passo de tempo, com interpolação na interface entre as regiões móvel e fixa, o que permite capturar os efeitos transientes de passagem das pás, mas a um custo computacional consideravelmente elevado, por exigir passos de tempo reduzidos e a atualização contínua da interface. O MRF, por sua vez, resolve a zona do impelidor em um referencial rotativo com a malha estacionária, constituindo uma aproximação de regime permanente do tipo rotor congelado, de custo muito inferior (LUO; ISSA; GOSMAN, 1994; BRUCATO et al., 1998).

No presente trabalho, o interesse recai sobre a estrutura média do escoamento e sobre a identificação de regiões estagnadas, e não sobre a dinâmica transiente de passagem das pás. A zona morta é uma característica persistente e quase estacionária do escoamento, adequadamente

capturada pela solução em referencial rotativo. Ademais, o caráter exploratório e parametrizável do arcabouço exige a simulação de um grande número de configurações, para o qual o custo de uma formulação de malha deslizante seria proibitivo. Por essas razões, o MRF representa o compromisso adequado entre fidelidade física e viabilidade computacional para os objetivos deste trabalho, ficando a formulação de malha deslizante indicada para estudos futuros que demandem a dinâmica temporal do escoamento.

Quanto às condições de contorno, adotou-se a condição de não deslizamento nas paredes do vaso e nas superfícies do impelidor. Destaca-se, neste ponto, uma decisão de modelagem essencial e não trivial: as paredes do impelidor foram mantidas geometricamente estacionárias, com a rotação contabilizada exclusivamente pelo referencial rotativo da zona MRF. A imposição simultânea de uma velocidade rotativa explícita a essas paredes, embora possa parecer intuitiva, constitui uma especificação redundante e inconsistente, resultando em incompatibilidade entre o movimento da parede e o do referencial, com consequente perda de estabilidade da solução. Verificou-se experimentalmente que essa dupla especificação conduzia à divergência do *solver*, e que a formulação correta, com a rotação definida em um único local, restabelece a consistência do problema.

Para o campo de pressão adotou-se a condição de gradiente nulo nas paredes, resolvendo-se a variável de pressão descontada da parcela hidrostática, conforme praticado em escoamentos com estratificação de massa específica. A superfície superior do domínio foi tratada como parede, uma vez que a célula de envelhecimento opera confinada e pressurizada, sem superfície livre exposta.

### 3.2.6 CONDIÇÕES INICIAIS

A condição inicial reproduz a configuração de repouso que antecede o ensaio: o fluido em repouso e o material particulado depositado no fundo do vaso. Empregou-se o utilitário `setFields` para inicializar a fase sólida como um leito depositado na região inferior do domínio, com fração volumétrica de 0,15, correspondente ao teor determinado por retorta, sendo o restante do volume ocupado exclusivamente pela fase fluida. A região inicial de sólidos corresponde à metade inferior do vaso, até a altura de 110 mm a partir do fundo; essa extensão, conjugada à fração volumétrica de 0,15, define a quantidade total de material particulado introduzida no domínio. Os campos de velocidade de ambas as fases foram inicializados como nulos em todo o domínio.

Essa escolha é fisicamente coerente com o procedimento experimental, no qual a agitação é iniciada a partir de uma condição de repouso, e permite que a suspensão, ou a ausência dela, emerja como resultado da simulação, e não como imposição inicial.

### 3.2.7 ESQUEMAS NUMÉRICOS E CONTROLE DA SOLUÇÃO

A discretização das equações governantes seguiu o método dos volumes finitos, conforme implementado no OpenFOAM. Os esquemas adotados estão sintetizados na Tabela 4.

Tabela 4 – Esquemas numéricos adotados na discretização.

| Termo                                | Esquema                               |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Derivada temporal                    | Euler implícito de primeira ordem     |
| Gradiente                            | Gauss linear com limitação por célula |
| Convecção da quantidade de movimento | Gauss <i>linearUpwind</i>             |
| Convecção da fração volumétrica      | Gauss van Leer                        |
| Termos laplacianos                   | Gauss linear com correção limitada    |
| Interpolação                         | Linear                                |

Fonte: Autor.

A escolha do esquema van Leer para o transporte da fração volumétrica justifica-se por seu caráter limitado, que assegura a limitação da fração entre zero e a unidade, evitando valores fisicamente inadmissíveis. Para a convecção da quantidade de movimento, o esquema *linearUpwind* oferece precisão de segunda ordem com estabilidade adequada. Nos termos laplacianos e no gradiente normal às faces, adotou-se correção limitada, decisão motivada pela não ortogonalidade inerente à malha tetraédrica: a correção plena tende a comprometer a estabilidade em malhas com elevada não ortogonalidade, ao passo que a limitação preserva a robustez sem perda relevante de precisão.

O acoplamento pressão-velocidade foi tratado pelo algoritmo PIMPLE, combinando as estratégias PISO e SIMPLE, com quatro correções externas, duas correções de pressão por laço e uma correção de não ortogonalidade. O transporte da fração volumétrica foi resolvido com subciclagem, adotando-se cinco subciclos e duas correções, o que permite avançar o campo de fração com passo de tempo reduzido em relação ao das demais equações, aumentando a robustez sem penalizar excessivamente o custo.

O passo de tempo foi controlado de forma adaptativa, com base em limites máximos para os números de Courant do escoamento e do transporte de fração volumétrica, ambos fixados em 0,5, e com passo máximo limitado. O tempo físico simulado estendeu-se por 60 segundos, garantindo que a solução ultrapassasse amplamente a rampa de rotação e alcançasse uma condição desenvolvida.

Ressalta-se uma distinção quanto aos critérios de encerramento em cada nível. O laço externo do PIMPLE é encerrado, a cada passo de tempo, pelo controle de resíduos descrito na Seção 3.2.8. Já a simulação como um todo não é encerrada por um critério global de resíduo, mas conduzida até um tempo físico final explícito. Essa opção é fisicamente motivada: campos como pressão e velocidade convergem rapidamente, ao passo que os fenômenos de interesse, a sedimentação do material particulado e a reestruturação tixotrópica do gel, evoluem em escalas de tempo consideravelmente mais lentas. Encerrar a simulação com base apenas na convergência

dos campos rápidos a interromperia antes que a física lenta se manifestasse, produzindo um resultado prematuro.

### 3.2.8 CRITÉRIOS DE CONVERGÊNCIA

A convergência foi controlada em dois níveis: o dos sistemas lineares, resolvidos a cada equação, e o do acoplamento não linear entre as equações, no laço do algoritmo PIMPLE.

No nível dos sistemas lineares, adotaram-se tolerâncias absolutas de resíduo específicas para cada campo. A equação de pressão, na variável descontada da hidrostática, foi resolvida pelo método dos gradientes conjugados com pré-condicionador incompleto, com tolerância de  $10^{-6}$ . As equações de quantidade de movimento e as demais grandezas transportadas foram resolvidas por gradiente biconjugado estabilizado, com tolerância de  $10^{-6}$ . A equação de fração volumétrica foi resolvida por um *solver* suavizador, com tolerância mais rigorosa, de  $10^{-8}$ , dada a importância da limitação dessa variável. A equação de energia foi desativada, uma vez que a simulação é conduzida em regime isotérmico. Empregaram-se fatores de sub-relaxação de 0,3 para a pressão, 0,7 para a velocidade e 1,0 para a fração volumétrica.

No nível do acoplamento, o laço externo do algoritmo PIMPLE foi limitado a um máximo de quatro correções externas, com duas correções de pressão e uma correção de não ortogonalidade por iteração. Esse laço foi governado por controle de resíduos, sendo a solução considerada convergida, a cada passo de tempo, quando os resíduos da pressão e da velocidade caíam abaixo de  $10^{-5}$ .

O critério de estabilização temporal da solução baseou-se no acompanhamento da evolução do escoamento ao longo do tempo físico simulado. Após a rampa de rotação, considera-se atingida uma condição desenvolvida e quase estacionária quando os campos deixam de variar apreciavelmente. Para tanto, monitoraram-se duas grandezas integrais: a integral de volume da fração de sólidos, como verificação da conservação de massa, e a velocidade quadrática média global do escoamento, como indicador da estabilização do campo de velocidade. Os valores efetivamente obtidos para essas grandezas, que confirmam a estabilização, são apresentados no Capítulo de Resultados.

### 3.2.9 PROCESSAMENTO PARALELO E AUTOMAÇÃO DO FLUXO DE TRABALHO

A simulação foi executada em paralelo, com o domínio decomposto em quatro sub-domínios pelo método *scotch*, que minimiza a área de interface entre partições. Adotou-se o modo de escrita não agrupado dos arquivos, escolha motivada por instabilidades de comunicação observadas com o modo agrupado.

Todo o fluxo de trabalho foi automatizado por meio de um único *script* de execução, que encadeia as etapas de geração da geometria e da malha, conversão de formato, ajuste

dos contornos, verificação da malha, criação das zonas celulares, inicialização dos campos, decomposição do domínio, solução e reconstrução dos resultados. O *script* foi construído segundo o princípio de falha rápida: cada etapa é verificada quanto ao seu sucesso, e a detecção de qualquer erro interrompe imediatamente a execução, impedindo que etapas subsequentes operem sobre resultados inválidos.

Essa automação não constitui mera conveniência operacional. Ela é o elemento que confere ao arcabouço a propriedade de reprodutibilidade e que viabiliza, na prática, a variação sistemática de parâmetros: qualquer alteração geométrica ou operacional é propagada automaticamente por toda a cadeia, da geometria ao pós-processamento, sem intervenção manual e sem risco de inconsistência entre etapas.

### 3.2.10 PÓS-PROCESSAMENTO E EXTRAÇÃO DE RESULTADOS

O pós-processamento foi conduzido no software livre ParaView. Além dos campos primários resolvidos pelo *solver* (velocidade de cada fase, pressão e fração volumétrica), foram extraídas grandezas derivadas de interesse.

A magnitude do gradiente de velocidade, proporcional à taxa de deformação e empregada na caracterização do campo de cisalhamento, foi obtida por meio de funções nativas do OpenFOAM, executadas durante a simulação. Registra-se que uma implementação inicial, baseada em função codificada pelo usuário, mostrou-se inadequada em execução paralela, por realizar operações de comunicação entre processos de forma insegura, resultando em falha da simulação. A substituição por funções nativas, além de restabelecer a estabilidade, confere maior confiabilidade e reprodutibilidade ao procedimento, por tratar-se de implementações validadas pelo próprio código.

Empregou-se ainda a média temporal do campo de velocidade, acumulada após o estabelecimento do escoamento desenvolvido. A adoção do campo médio, em detrimento do campo instantâneo, elimina flutuações transientes e fornece uma representação mais estável e representativa da estrutura do escoamento.

Como verificação numérica, monitorou-se continuamente a integral de volume da fração volumétrica de sólidos ao longo de toda a simulação. Essa grandeza foi adotada como métrica da conservação da massa da fase dispersa, permitindo distinguir acúmulos decorrentes de redistribuição física de eventuais perdas ou criações numéricas de massa. Ressalta-se que se trata de métrica de consistência numérica, que não estabelece, por si só, a exatidão física da distribuição predita. O resultado dessa verificação é apresentado no Capítulo de Resultados.

### 3.2.11 CARACTERIZAÇÃO ADIMENSIONAL DO ESCOAMENTO

A fim de situar o regime de escoamento, procedeu-se à caracterização adimensional do sistema. Para fluidos não newtonianos, a determinação do número de Reynolds do impelidor

requer a definição de uma viscosidade aparente representativa, avaliada a uma taxa de cisalhamento característica. Adotou-se, para tanto, a aproximação clássica segundo a qual a taxa de cisalhamento média imposta pelo impelidor é proporcional à sua velocidade de rotação, sendo a constante de proporcionalidade dependente do tipo de impelidor.

Avaliada a viscosidade aparente do modelo reológico a essa taxa característica, obtém-se o número de Reynolds do impelidor. Adicionalmente, computou-se o número de Bingham, definido como a razão entre a tensão de escoamento e a tensão viscosa avaliada na taxa característica, o qual quantifica a importância relativa da plasticidade do fluido. Valores elevados desse parâmetro indicam predominância do comportamento plástico e favorecem o confinamento do escoamento a uma região restrita nas vizinhanças do impelidor.

Os valores obtidos situam o escoamento em regime laminar a transicional, distante do limiar de plena turbulência. Somando-se a isso o efeito de amortecimento das flutuações, promovido pela elevada viscosidade aparente do fluido nas regiões de baixo cisalhamento, não se justificou o emprego de modelo de turbulência, tendo o escoamento sido tratado como laminar. Trata-se de decisão coerente com o regime identificado, e não de simplificação arbitrária.

### 3.2.12 CRITÉRIO DE IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES ESTAGNADAS

A identificação de regiões estagnadas apoiou-se em três indicadores complementares e independentes entre si, estratégia adotada para evitar que a caracterização repouse sobre um único critério, necessariamente arbitrário em alguma medida.

O primeiro indicador é o campo de velocidade média: consideram-se estagnadas as regiões nas quais a magnitude da velocidade permanece abaixo de uma pequena fração da velocidade periférica das pás, adotando-se essa velocidade como escala característica do problema. O segundo indicador é o campo de taxa de cisalhamento: a região não escoada, exterior à caverna formada em torno do impelidor, caracteriza-se por cisalhamento muito reduzido, uma vez que a tensão local é insuficiente para vencer a tensão de escoamento do fluido. O terceiro indicador é o acúmulo de fase sólida: em regiões onde a velocidade local é insuficiente para manter as partículas em suspensão, o material sedimenta e se acumula, revelando fisicamente a estagnação.

A convergência desses três indicadores sobre uma mesma região do domínio confere robustez à identificação, ao passo que a discordância entre eles indicaria fragilidade do critério. Registra-se, contudo, uma distinção conceitual relevante: velocidade reduzida e cisalhamento reduzido não são coincidentes. Uma região pode encontrar-se praticamente estagnada em seu núcleo e, simultaneamente, apresentar cisalhamento apreciável em sua fronteira, em virtude do movimento relativo ao escoamento circundante. Os dois campos, portanto, são complementares na delimitação da região estagnada, e não redundantes.

### 3.2.13 LIMITAÇÕES DA ABORDAGEM ADOTADA

Registram-se, por transparência metodológica, as principais limitações da abordagem.

O Modelo de Referência Múltipla constitui aproximação de regime permanente, do tipo rotor congelado, não representando os efeitos transientes de passagem das pás nem eventuais flutuações não estacionárias da fronteira da região escoada. A representação dessa dinâmica temporal demandaria formulação de malha deslizante, de custo computacional consideravelmente superior e incompatível com o caráter exploratório e paramétrico pretendido nesta etapa do trabalho.

Adicionalmente, a verificação do modelo apoia-se em consistência interna (conservação de fases, coerência entre indicadores independentes e independência de malha) e em consistência qualitativa com o comportamento observado no aparato físico. Uma validação quantitativa plena demandaria confronto com dados experimentais de campo de velocidade ou de consumo de potência no eixo, o que se propõe como desdobramento natural deste trabalho.

## 3.3 USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ELABORAÇÃO DESTA MONOGRAFIA

Registra-se, por transparência, que ferramentas de inteligência artificial baseadas em modelos de linguagem foram empregadas como apoio durante a elaboração deste trabalho. O uso concentrou-se, de forma extensiva, na busca e na consulta de documentação técnica dos softwares utilizados, notadamente OpenFOAM, Gmsh e ParaView, cuja documentação é vasta e dispersa, auxiliando na localização de utilitários, dicionários de configuração e opções de *solver* pertinentes à construção do modelo. As ferramentas foram igualmente empregadas na busca de referências e de documentação que fundamentassem escolhas de modelagem adotadas durante a concepção e a implementação do modelo, tais como a seleção do modelo de arrasto, do fechamento da fase sólida e do tratamento da rotação, permitindo confrontar as decisões tomadas com práticas consolidadas na literatura.

O emprego dessas ferramentas restringiu-se ao papel de apoio à pesquisa e à organização do conhecimento, cabendo ao autor a concepção do trabalho, a construção e a execução do modelo, a análise crítica dos resultados e a redação final. Todas as referências e informações técnicas obtidas com esse auxílio foram verificadas junto às fontes primárias antes de sua incorporação ao texto.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos com o arcabouço computacional descrito no Capítulo 3. Coerentemente com o objetivo do trabalho, centrado na concepção e na construção de um modelo estável e parametrizável, os resultados são organizados de modo a estabelecer, primeiro, a confiabilidade numérica do modelo; em seguida, a coerência física do escoamento reproduzido; então, a demonstração da capacidade do modelo em reproduzir o fenômeno de interesse, a zona morta; e, por fim, a demonstração da parametrização e do potencial do pipeline para estudos futuros de otimização. Salvo indicação em contrário, os campos apresentados correspondem a uma condição desenvolvida, posterior à rampa de rotação, e os cortes foram tomados em um plano vertical que contém o eixo do impelidor.

### 4.1 VERIFICAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO

Antes da análise dos campos de escoamento, é necessário estabelecer que a solução obtida é numericamente confiável. Em um trabalho cuja contribuição principal é o próprio modelo, essa verificação não é um detalhe acessório, mas parte central do resultado: um arcabouço só é útil como base para estudos futuros se for demonstravelmente consistente.

A primeira verificação diz respeito à conservação da massa da fase sólida. Ao longo de toda a simulação, monitorou-se a integral de volume da fração volumétrica de sólidos em todo o domínio, grandeza que corresponde ao volume total de material particulado presente. Essa integral manteve-se constante ao longo do tempo, o que atesta que o solver conserva a massa da fase dispersa e que nenhuma quantidade de sólido é numericamente criada ou destruída durante o transiente. Trata-se de uma garantia essencial, pois assegura que qualquer acúmulo localizado de material observado nos resultados subsequentes decorre de redistribuição física, associada à sedimentação, e não de artefato numérico. Reitera-se, contudo, que a conservação de massa é uma métrica de consistência numérica, e não uma prova de exatidão física da distribuição predita, a qual demandaria confronto experimental.

A segunda verificação refere-se à independência de malha. Esta foi avaliada resolvendo-se o mesmo caso em três níveis de refinamento (uma malha grosseira, a malha de referência e uma malha refinada), adotando-se como métrica a velocidade quadrática média (RMS) do escoamento, uma grandeza integral representativa da estrutura global do campo de velocidade. A Tabela 5 apresenta os resultados. Observa-se que a malha grosseira, com 26.485 células, apresenta um desvio de aproximadamente 4,7% em relação à malha refinada, mostrando-se insuficiente. A partir da malha de referência, com 52.535 células, a solução estabiliza-se: um refinamento adicional de mais de quatro vezes no número de células, até 224.897, altera a velocidade RMS em apenas 0,3%. Conclui-se que a malha de referência fornece uma solução

praticamente independente do refinamento, justificando a sua adoção nas simulações deste trabalho.

Tabela 5 – Teste de independência de malha baseado na velocidade quadrática média (RMS) do escoamento.

| Malha      | Número de células | Velocidade RMS ( $\text{m s}^{-1}$ ) | Variação relativa (%) |
|------------|-------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| Grosseira  | 26.485            | 0,1225                               | 4,7                   |
| Referência | 52.535            | 0,1290                               | 0,3                   |
| Refinada   | 224.897           | 0,1286                               | –                     |

Fonte: Autor.

Estabelecida a conservação das fases, procede-se à análise do escoamento.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO

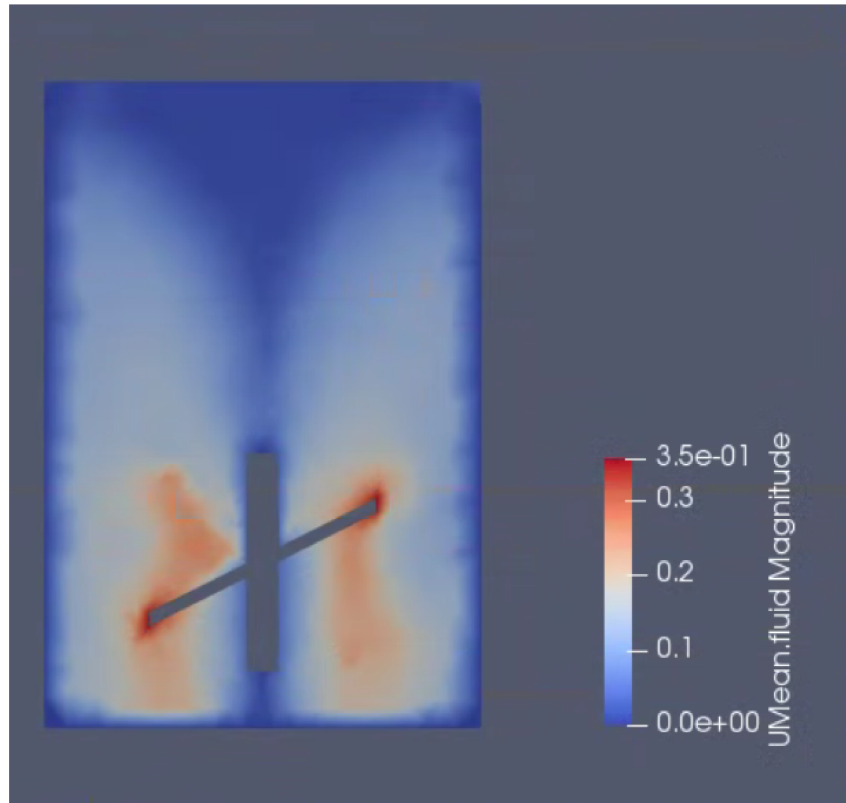
A Figura 13 apresenta a magnitude da velocidade média do fluido no plano vertical que contém o eixo. O campo exibe o padrão característico de uma turbina de pás inclinadas: dois jatos de descarga emergem das pontas das pás e alimentam duas alças de recirculação que ascendem pelas laterais do vaso. A velocidade máxima no campo permanece abaixo da velocidade periférica das pás, comportamento fisicamente esperado. Observa-se, logo abaixo do cubo do impelidor, uma região compacta de velocidade próxima de zero, indicativo preliminar da região estagnada que será caracterizada na Seção 4.3.

A Figura 14 apresenta a magnitude do gradiente de velocidade, proporcional à taxa de cisalhamento, no mesmo plano e em escala logarítmica. Os maiores valores concentram-se nas bordas das pás, onde o fluido é intensamente cisalhado e a estrutura tixotrópica é rompida, ao passo que a região afastada do impelidor apresenta cisalhamento muito reduzido. Este campo evidencia a caverna escoada em torno do impelidor, cercada pela região não escoada.

É oportuno observar, neste ponto, uma distinção conceitual relevante entre os dois campos. Velocidade reduzida e cisalhamento reduzido não coincidem exatamente. O núcleo imediatamente abaixo do cubo encontra-se praticamente estagnado; entretanto, sua fronteira é cisalhada pelo escoamento de descarga que a circunda. Por essa razão, o campo de cisalhamento delimita a região não misturada de forma complementar, e não idêntica, ao campo de velocidade. Os dois campos, tomados em conjunto, delimitam com mais robustez a extensão do material estagnado do que qualquer um deles isoladamente.

Para quantificar a estrutura do escoamento, extraiu-se a magnitude da velocidade média ao longo de linhas de referência. A Figura 15 apresenta o perfil axial, ao longo do eixo central do vaso. A velocidade é reduzida na região inferior, associada à zona morta, e cresce em direção à descarga do impelidor. A descontinuidade do perfil corresponde à região ocupada pelo eixo do impelidor, onde não há fluido, e não deve ser interpretada como dado de escoamento.

Figura 13 – Magnitude da velocidade média do fluido ( $\text{m s}^{-1}$ ) em plano vertical contendo o eixo do impelidor.



Fonte: Autor.

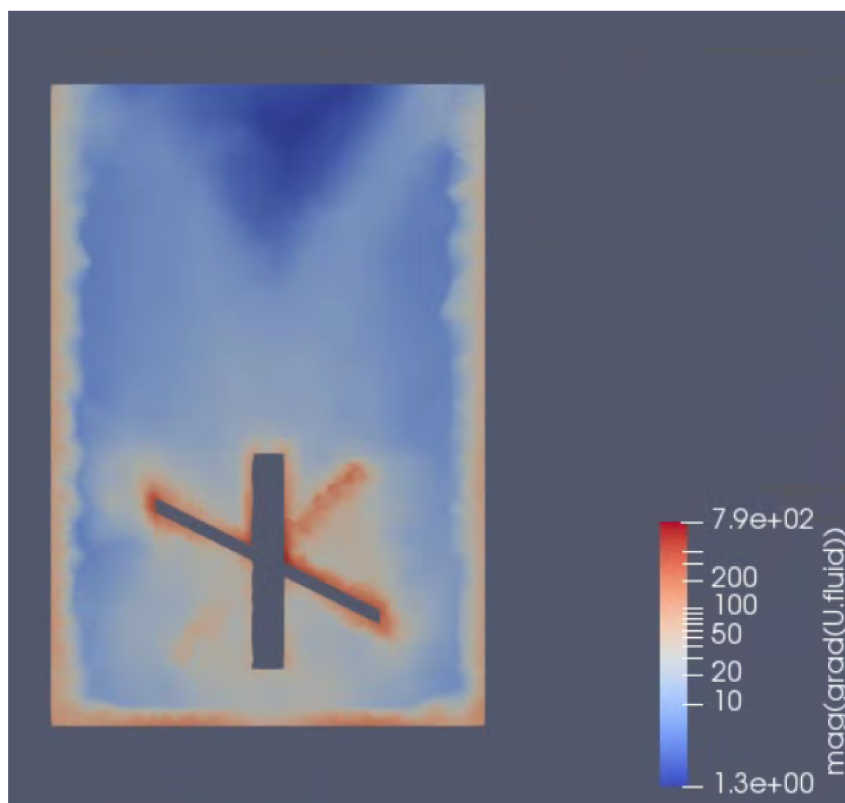
A Figura 16 apresenta o perfil radial, na altura do impelidor. O perfil exhibe o duplo pico esperado, associado à descarga nas pontas das pás, e uma forma aproximadamente simétrica em relação ao eixo. Essa simetria radial constitui um indicador qualitativo de que o campo médio se encontra bem desenvolvido e livre de viés espúrio, reforçando a consistência dos resultados.

### 4.3 DEMONSTRAÇÃO DE CAPACIDADE: REPRODUÇÃO DA ZONA MORTA

Uma vez estabelecida a coerência física do escoamento, avalia-se a capacidade do modelo em reproduzir o fenômeno que motiva o trabalho: a formação de uma zona morta abaixo do impelidor. Conforme o critério da Seção 3.2.12, a identificação apoia-se em três indicadores independentes.

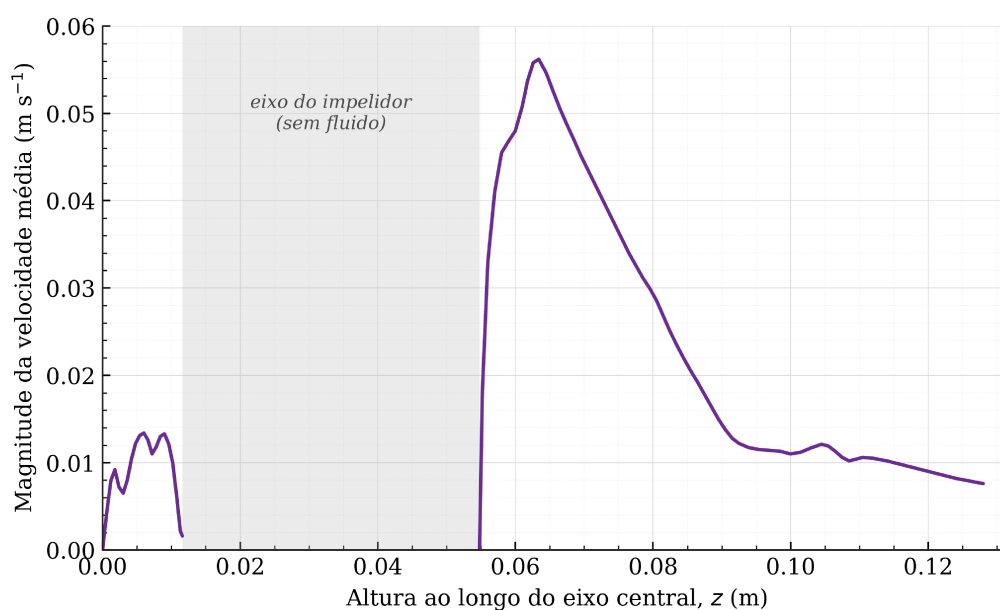
Os dois primeiros indicadores já foram apresentados na seção anterior. O campo de velocidade média (Figura 13) revela um núcleo de velocidade próxima de zero centralmente localizado abaixo do impelidor, poupado pelo bombeamento axial das pás. O campo de cisalhamento (Figura 14) revela, na mesma região e em seu entorno, valores muito reduzidos, característicos de material não escoado.

Figura 14 – Magnitude do gradiente de velocidade ( $\text{s}^{-1}$ ), proporcional à taxa de cisalhamento, em plano vertical, em escala logarítmica.



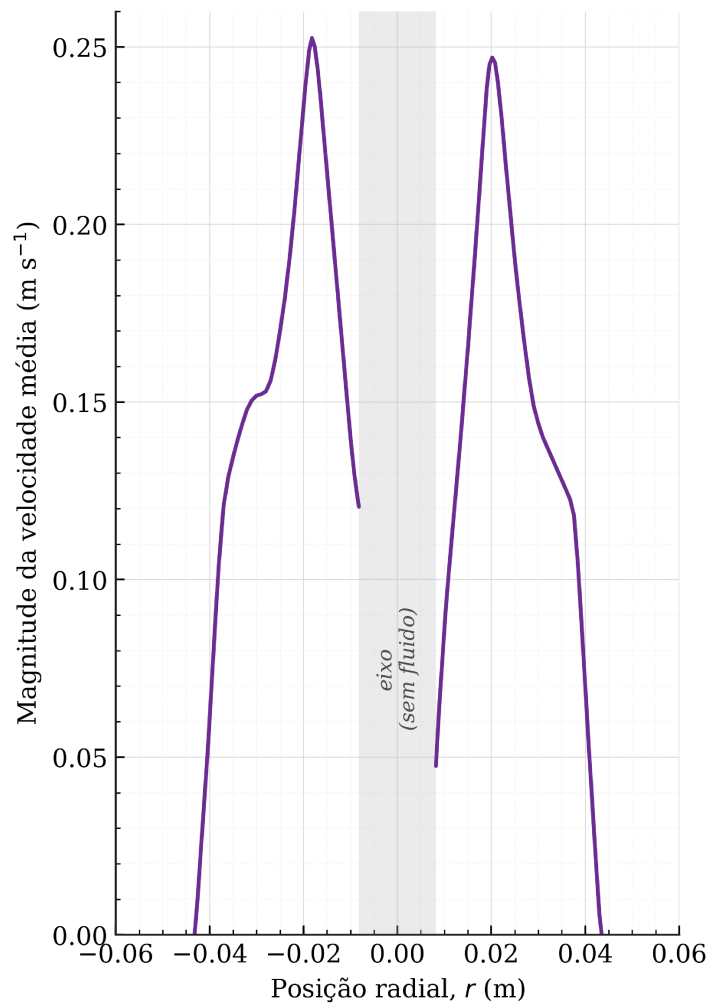
Fonte: Autor.

Figura 15 – Perfil axial da magnitude da velocidade média ( $\text{m s}^{-1}$ ) ao longo do eixo central do vaso. A faixa sombreada corresponde ao eixo do impelidor, onde não há fluido.



Fonte: Autor.

Figura 16 – Perfil radial da magnitude da velocidade média ( $\text{m s}^{-1}$ ) ao longo do diâmetro do vaso, na altura do impelidor. A faixa sombreada corresponde ao eixo, onde não há fluido.

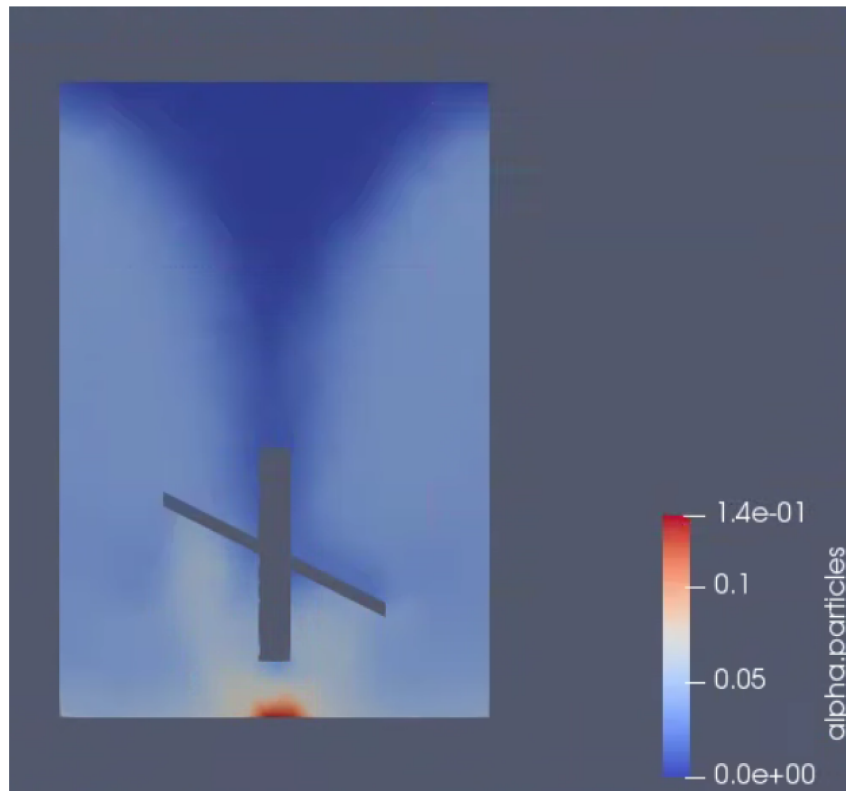


Fonte: Autor.

O terceiro indicador, o acúmulo de fase sólida, é apresentado na Figura 17, que mostra a fração volumétrica de sólidos no plano vertical. Observa-se um acúmulo pronunciado de material no fundo do vaso, diretamente abaixo do impelidor, na mesma região indicada pelos dois indicadores anteriores. Esse acúmulo constitui evidência física independente da estagnação: a velocidade local naquela região é insuficiente para ressuspender as partículas, que sedimentam e ali permanecem, enquanto o restante do vaso apresenta-se comparativamente empobrecido em sólidos. Verifica-se, ademais, que o pico de fração de sólidos na região de acúmulo permanece próximo ao valor inicialmente semeado e muito abaixo da fração de empacotamento máximo, o que indica um leito incipiente e pouco compactado, e não um leito plenamente empacotado.

A convergência dos três indicadores independentes sobre a mesma região do domínio constitui o principal resultado físico do trabalho. Não se trata de três medidas da mesma grandeza, mas de três manifestações distintas do mesmo fenômeno: baixa velocidade, baixo cisalhamento e acúmulo de sólidos apontam, de forma coerente, para uma região estagnada centralmente

Figura 17 – Fração volumétrica de sólidos (adimensional) em plano vertical. O acúmulo no fundo, abaixo do impelidor, coincide com a região de baixa velocidade e baixo cisalhamento.



Fonte: Autor.

localizada abaixo do impelidor. Essa coerência multicritério fortalece a identificação e demonstra que o modelo construído reproduz, de maneira fisicamente consistente, a zona morta observada qualitativamente no aparato físico.

Ressalta-se o caráter dessa demonstração. O resultado estabelece a capacidade do arcabouço em representar o fenômeno de interesse, servindo como prova de conceito do modelo. Não se afirma, nesta etapa, uma predição quantitativa validada da geometria ou do volume exato da zona morta, o que dependeria do teste de independência de malha e de validação experimental, discutidos como desdobramentos do trabalho.

#### 4.4 DEMONSTRAÇÃO DA PARAMETRIZAÇÃO E DO POTENCIAL PARA OTIMIZAÇÃO

O resultado precedente demonstra que o modelo reproduz o fenômeno de interesse. Resta demonstrar aquilo que constitui a contribuição central deste trabalho: que o modelo não é uma solução isolada, ajustada a uma única configuração, mas um arcabouço parametrizável e automatizado, apto a sustentar estudos sistemáticos de otimização.

Conforme descrito no Capítulo 3, a geometria é integralmente definida por variáveis

em um *script*, e todo o fluxo de trabalho, da geração da geometria e da malha à solução e ao pós-processamento, é encadeado por um único *script* de execução dotado de verificação de falhas. A consequência prática dessa arquitetura é direta: a investigação de uma nova configuração geométrica ou operacional não exige a reconstrução manual do caso, mas apenas a alteração do valor de uma variável, sendo todas as etapas subsequentes propagadas automaticamente e de forma consistente.

Essa propriedade habilita, sem esforço adicional de modelagem, a exploração sistemática do espaço de projeto da célula de envelhecimento. Pela alteração de variáveis no *script* paramétrico, podem ser variados, de forma programática, os parâmetros geométricos do vaso e do impelidor. Entre os parâmetros geométricos passíveis de variação figuram o diâmetro interno e a altura do vaso; o diâmetro do impelidor e, por consequência, a razão entre o diâmetro do impelidor e o do vaso; o número de pás; o ângulo de inclinação das pás; a altura e a espessura das pás; o diâmetro do eixo; a folga do impelidor em relação ao fundo; e a posição axial do impelidor ao longo do eixo. A cada alteração, a geometria e a malha são regeneradas automaticamente, incluindo o refinamento localizado junto às pás e a redefinição da zona rotativa do Modelo de Referência Múltipla, sem qualquer intervenção manual.

De igual modo, parâmetros operacionais e de modelagem podem ser variados de forma programática, entre eles a velocidade de rotação do impelidor e sua rampa de partida, a fração volumétrica inicial de sólidos, o diâmetro médio das partículas e as propriedades das fases, além dos parâmetros do modelo reológico tixotrópico e dos fechamentos da fase sólida. Dessa forma, tanto a configuração do equipamento quanto as condições do ensaio e as propriedades do fluido tornam-se variáveis de projeto acessíveis à investigação.

O caráter automatizado e verificável do pipeline permite, ainda, que de cada iteração sejam extraídas, de forma reprodutível, as grandezas-chave de interesse para a comparação entre configurações. Ao final de cada caso, o pós-processamento pode computar automaticamente indicadores como o volume da região estagnada, definido pelo critério de baixa velocidade; a fração de volume morto, obtida pela razão entre esse volume e o volume total útil; o volume e a distribuição do acúmulo de sólidos no fundo; os campos médios de velocidade e de cisalhamento; e os números adimensionais característicos do escoamento. A obtenção sistemática dessas métricas, uma por iteração, é precisamente o insumo requerido por estudos de otimização, sejam eles conduzidos por variação sistemática de parâmetros, sejam por acoplamento a algoritmos de busca.

A relevância dessa capacidade transcende o presente trabalho. Estudos de otimização em CFD, seja pela variação sistemática de parâmetros, seja pelo acoplamento a algoritmos de otimização, dependem criticamente da possibilidade de gerar e resolver, de forma automática e reprodutível, um grande número de configurações. O gargalo desses estudos raramente reside na física, e sim na construção manual e propensa a erros de cada caso individual. Ao encapsular geometria, malha, condições de simulação e pós-processamento em um pipeline parametrizado

e verificável, o arcabouço aqui desenvolvido remove esse gargalo e converte a exploração do espaço de projeto em uma tarefa tratável.

Desse modo, ainda que a otimização geométrica propriamente dita não integre o escopo desta etapa, o trabalho entrega o instrumento que a viabiliza. A demonstração da reprodução da zona morta, apresentada na seção anterior, assegura que esse instrumento produz resultados fisicamente coerentes; a demonstração da parametrização, apresentada nesta seção, assegura que ele pode ser aplicado, de forma sistemática, a um número arbitrário de configurações. Em conjunto, os dois resultados sustentam a proposição central do trabalho: a de que foi construído um modelo estável, coerente e parametrizável, apto a servir de base para estudos futuros de otimização de células de envelhecimento de fluidos de perfuração.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho teve como objetivo conceber, fundamentar e construir, do zero e em *software* livre, um modelo computacional baseado em CFD para a simulação do escoamento de fluidos de perfuração em células de envelhecimento dotadas de impelidor, estabelecendo um arcabouço estável e parametrizável apto a subsidiar estudos futuros. Ao final do desenvolvimento, considera-se que esse objetivo foi alcançado.

O modelo foi construído de forma incremental na plataforma OpenFOAM, acoplado a formulação Euler-Euler bifásica, o fechamento da fase sólida pela teoria cinética dos escoamentos granulares, a força de arrasto de Gidaspow, a reologia tixotrópica de Houska com evolução temporal do parâmetro estrutural e a representação da rotação do impelidor pelo Modelo de Referência Múltipla. A caracterização experimental do fluido, por retorta, picnometria a gás e ensaio de tixotropia, forneceu os parâmetros físicos que asseguram que o escoamento simulado corresponde ao de um fluido real.

A confiabilidade numérica do modelo foi verificada pelo teste de independência de malha e da conservação da massa da fase sólida ao longo de toda a simulação, o que garante que os acúmulos observados decorrem de redistribuição física, e não de artefato numérico. Verificada essa consistência, o modelo demonstrou reproduzir, de maneira fisicamente coerente, a formação de uma zona morta centralmente localizada abaixo do impelidor, identificada pela convergência de três indicadores independentes: o campo de velocidade média, o campo de taxa de cisalhamento e o acúmulo de fase sólida. Essa convergência multicritério constitui o principal resultado físico do trabalho e serve como prova de conceito da capacidade do modelo.

Mais do que reproduzir um resultado pontual, o trabalho entregou um arcabouço parametrizável e automatizado. A geometria é integralmente definida por variáveis, e todo o fluxo de trabalho, da geração da geometria e da malha à solução e ao pós-processamento, é encadeado de forma reprodutível e verificável. Essa arquitetura converte a exploração do espaço de projeto da célula de envelhecimento em uma tarefa tratável, constituindo o instrumento que viabiliza estudos posteriores de otimização.

### 5.1 CONTRIBUIÇÕES NA FORMAÇÃO PROFISSIONAL

O desenvolvimento deste trabalho proporcionou uma formação técnica e científica que transcende o conteúdo específico do tema abordado. A construção de um modelo CFD do zero, em *software* livre, exigiu o domínio prático de todas as etapas do fluxo de trabalho em dinâmica dos fluidos computacional, desde a geração paramétrica de geometrias e malhas até a configuração de *solvers* multifásicos, a execução em ambiente de processamento paralelo e o

pós-processamento e a análise crítica de grandes volumes de dados.

O caráter aberto da plataforma OpenFOAM, embora imponha uma curva de aprendizado acentuada, revelou-se formativo em um aspecto particular: a necessidade de compreender, e não apenas operar, os modelos físicos e os métodos numéricos empregados. A superação de dificuldades concretas de implementação, como o tratamento consistente das condições de contorno na modelagem da rotação, a estabilização de um sistema numérico fortemente acoplado e não linear, e a garantia de reprodutibilidade por meio da automação do fluxo de trabalho, consolidou competências em modelagem computacional, em depuração sistemática de problemas e em pensamento crítico aplicado à engenharia.

Adicionalmente, a articulação entre a caracterização experimental do fluido e a modelagem numérica evidenciou, na prática, a interdependência entre teoria, experimento e simulação, dimensão essencial à formação do engenheiro químico. A elaboração paralela de um artigo científico, submetido a congresso da área, contribuiu ainda para o desenvolvimento da capacidade de comunicação técnica e de síntese de resultados, competências indispensáveis à atuação profissional e à eventual continuidade na pós-graduação.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O arcabouço desenvolvido abre um conjunto amplo de desdobramentos, organizados a seguir por natureza.

No que tange à modelagem física, sugere-se a substituição da abordagem de referência múltipla por uma formulação de malha deslizante, de modo a capturar os efeitos transientes de passagem das pás e as flutuações não estacionárias da fronteira da região escoada, não representados pela aproximação de rotor congelado. Sugere-se também a incorporação de efeitos térmicos, aproximando a simulação das condições de alta temperatura características do envelhecimento real, bem como o refinamento da descrição reológica, explorando outros modelos tixotrópicos e a sua parametrização a partir de ensaios adicionais. Recomenda-se, ainda, a reprodução numérica do próprio ensaio de tixotropia em três intervalos de tempo (3ITT), submetendo o modelo de Houska implementado ao mesmo histórico de cisalhamento aplicado experimentalmente; esse exercício permitiria confrontar diretamente a resposta transiente prevista com a medida e aproveitar plenamente a componente tixotrópica da reologia, cuja evolução temporal é apenas parcialmente solicitada na configuração agitada estudada.

No que vincula-se à aplicação do arcabouço, e como desdobramento mais alinhado à contribuição central deste trabalho, destaca-se que o pipeline parametrizado e automatizado constitui uma ferramenta de propósito geral para a condução de campanhas de simulação voltadas à busca de valores ótimos. Por desacoplar a definição do caso da sua construção manual, o arcabouço permite gerar e resolver, de forma sistemática e reprodutível, um grande número de configurações, extraindo de cada iteração as métricas de interesse, o que é precisamente o

insumo requerido por qualquer procedimento de otimização.

Como aplicação imediata, prospecta-se a realização de um estudo paramétrico sistemático, explorando o efeito de parâmetros geométricos e operacionais sobre a extensão da zona morta e sobre a uniformidade do cisalhamento imposto ao fluido. A capacidade já estabelecida permite, ademais, o acoplamento do modelo a algoritmos de otimização, como métodos de superfície de resposta, algoritmos evolutivos ou técnicas de otimização assistida por metamodelos, com vistas ao projeto de células de envelhecimento que minimizem regiões estagnadas e maximizem a representatividade do tratamento aplicado ao fluido.

O escopo de aplicação, contudo, não se restringe à geometria da célula nem à minimização da zona morta. O mesmo arcabouço pode ser direcionado à busca de condições operacionais ótimas, como a velocidade de rotação que assegure a suspensão adequada dos sólidos ao menor consumo de potência, ou à identificação de configurações que reproduzam, no laboratório, um campo de cisalhamento prescrito, mais representativo das solicitações reais do poço. Dessa forma, a mesma infraestrutura computacional serve a múltiplos objetivos de otimização, bastando redefinir a função-objetivo e as variáveis de projeto, o que evidencia o alcance e a longevidade da contribuição desenvolvida.

## REFERÊNCIAS

- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. *Boletim Mensal da Produção de Petróleo e Gás Natural*. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletim-mensal-da-producao-de-petroleo-e-gas-natural>. Acesso em: 01 fev. 2026. Citado na página 13.
- AMANULLAH, A.; HJORTH, S. A.; NIENOW, A. W. A new mathematical model to predict cavern diameters in highly shear thinning, power law liquids using axial flow impellers. *Chemical Engineering Science*, v. 53, n. 3, p. 455–469, 1998. Citado na página 17.
- BINGHAM, E. C. *Fluidity and Plasticity*. New York: McGraw-Hill Book Co., 1916. Citado 3 vezes nas páginas 21, 23 e 24.
- BOURGOYNE JR., A. T.; MILLHEIM, K. K.; CHENEVERT, M. E.; YOUNG JR., F. S. *Applied Drilling Engineering*. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 1986. v. 2. (SPE Textbook Series, v. 2). Citado 5 vezes nas páginas 13, 14, 17, 23 e 24.
- BRUCATO, A.; CIOFALO, M.; GRISAFI, F.; MICALE, G. Numerical prediction of flow fields in baffled stirred vessels: a comparison of alternative modelling approaches. *Chemical Engineering Science*, v. 53, n. 21, p. 3653–3684, 1998. Citado na página 49.
- CAENN, R.; DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*. 6. ed. [S.l.]: Gulf Professional Publishing, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- CARREAU, P. J. Rheological equations from molecular network theories. *Transactions of the Society of Rheology*, v. 16, n. 1, p. 99–117, 1972. Citado na página 25.
- CERNN. *Reologia de Fluidos de Perfuração em Altas Pressões e Altas Temperaturas (HPHT)*. 2022. Disponível em: <https://cernn.com.br/2022/01/21/reologia-de-fluidos-de-perfuracao-em-altas-pessoes-e-altas-temperaturas-hpht/>. Acesso em: 27 jul. 2025. Citado na página 17.
- CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. *Non-Newtonian Flow in the Process Industries: Fundamentals and Applications*. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2008. Citado 5 vezes nas páginas 12, 14, 22, 24 e 25.
- COUSSOT, P. et al. Flow and fracture of yield stress fluids. *Rheologica Acta*, v. 41, n. 3, p. 240–249, 2002. Citado na página 23.
- FARIAS, K. V.; AMORIM, L. V.; SILVA, R. Avaliação do Envelhecimento de Fluidos de Perfuração Poliméricos para Poços de Petróleo. In: *Anais do 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECiMat)*. Campos do Jordão, SP: [s.n.], 2010. p. 8842–8849. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3. ed. [S.l.]: Springer, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 17, 32 e 33.

GEUZAINÉ, C.; REMACLE, J.-F. Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 79, n. 11, p. 1309–1331, 2009. Citado na página 36.

GIDASPOW, D. *Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions*. [S.l.]: Academic Press, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

HERSCHEL, W. H.; BULKLEY, R. Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollösungen. *Kolloid-Zeitschrift*, v. 39, p. 291–300, 1926. Citado na página 24.

HOUSKA, M. *Engineering aspects of the rheology of thixotropic liquids*. Tese (Doutorado) — Czech Technical University, Prague, 1981. Citado na página 28.

International Energy Agency. *World Energy Outlook 2024*. 2024. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>>. Acesso em: 01 fev. 2026. Citado na página 12.

ISSA, R. I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. *Journal of Computational Physics*, v. 62, n. 1, p. 40–65, 1986. Citado na página 34.

JOHNSON, P. C.; JACKSON, R. Frictional-collisional constitutive relations for granular materials, with application to plane shearing. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 176, p. 67–93, 1987. Citado na página 32.

Kitware Inc. *ParaView: An Open-Source, Multi-Platform Data Analysis and Visualization Application*. 2024. Disponível em: <<https://www.paraview.org/>>. Citado na página 37.

LUO, J. Y.; ISSA, R. I.; GOSMAN, A. D. Prediction of impeller-induced flows in mixing vessels using multiple frames of reference. In: *Institution of Chemical Engineers Symposium Series*. [S.l.: s.n.], 1994. v. 136, p. 549–556. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 49.

MENDES, P. R. de S. Modeling the thixotropic behavior of structured fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 164, n. 1-3, p. 66–75, 2009. Citado na página 28.

MEWIS, J.; WAGNER, N. J. Thixotropy. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 147-148, p. 214–227, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 27.

MEZGER, T. G. *The Rheology Handbook*. 4. ed. [S.l.]: Vincentz Network, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 21, 25 e 26.

MOORE, F. The rheology of ceramic slips and bodies. *Transactions of the British Ceramic Society*, v. 58, p. 470–494, 1959. Citado na página 27.

MURTHY, B. N.; GHADGE, R.; JOSHI, J. B. CFD simulations of gas-liquid-solid stirred reactor: Prediction of critical impeller speed for solid suspension. *Chemical Engineering Science*, v. 62, n. 24, p. 7184–7195, 2007. Citado na página 18.

OLIVEIRA, F. F. d. *Hidrodinâmica de fluidos de perfuração em poços de petróleo e reservatório: modelagem e simulação via CFD*. 103 p. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2021. Citado na página 17.

OpenFOAM Foundation. *OpenFOAM User Guide*. 2024. Disponível em: <<https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/>>. Acesso em: 27 jul. 2025. Citado 3 vezes nas páginas 19, 34 e 35.

OSTWALD, W. Ueber die Geschwindigkeitsfunktion der Viskosität disperser Systeme. I. *Kolloid-Zeitschrift*, v. 36, n. 2, p. 99–117, 1925. Citado na página 23.

PASSOS, M. L. F.; FONTES, M. C. B.; FREIRE, J. T. Modeling of particulate suspensions in fluidized beds. In: *Advances in Multi-Phase Flow and Heat Transfer*. [S.l.]: Springer, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

PATANKAR, S. V.; SPALDING, D. B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 15, n. 10, p. 1787–1806, 1972. Citado na página 34.

PAUL, E. L.; ATIEMO-OBENG, V. A.; KRESTA, S. M. *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 18, 34 e 35.

Petrobras. *Pré-sal da Petrobras responde por mais de 1/3 da produção da América Latina*. 2023. Disponível em: <<https://agencia.petrobras.com.br/w/negocio/3-da-producao-da-america-latina>>. Acesso em: 01 fev. 2026. Citado na página 13.

Petrobras. *Petrobras atinge recordes na produção do pré-sal em 2024*. 2024. Disponível em: <<https://agencia.petrobras.com.br/w/negocio/petrobras-atinge-recordes-na-producao-do-pre-sal-em-2024-e-tem-maior-fator-de-utilizacao-das-suas-refina>>. Acesso em: 01 fev. 2026. Citado na página 13.

Petrobras. *Pré-sal: mergulhe nessa jornada ultraprofunda*. 2024. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pre-sal>>. Acesso em: 01 fev. 2026. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.

Pré-Sal Petróleo S.A. *Características do Pré-sal*. 2024. Disponível em: <<https://www.presalpetroleo.gov.br/caracteristicas/>>. Acesso em: 01 fev. 2026. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.

SHI, P.; RZEHA, R. Solid-liquid flow in stirred tanks: Euler-Euler/RANS modeling. *Chemical Engineering Science*, v. 227, p. 115875, 2020. Citado na página 18.

SOLOMON, J.; NIENOW, A. W.; PACE, G. W. Flow patterns in agitated plastic and pseudoplastic, viscoelastic fluids. In: *Fluid Mixing (IChemE Symposium Series)*. [S.l.]: Institution of Chemical Engineers, 1981. p. A1–A13. Citado na página 17.

SOUZA, G. R. S.; ALTINO, H. O. N.; DUARTE, C. R.; PEREIRA, M. S.; BARROZO, M. A. S. *Análise da estabilidade e reologia do fluido de perfuração com base olefínica*. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.

THOMAS, J. E. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 12, 13 e 15.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2. ed. [S.l.]: Pearson Education, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 17, 18, 32 e 33.

WAELE, A. D. Viscosity and plasticity. *Journal of the Oil and Colour Chemists' Association*, v. 6, p. 33–88, 1923. Citado na página 23.

WEI, Y.; SOLOMON, M. J.; LARSON, R. G. A multimode structural kinetics constitutive equation for the transient rheology of thixotropic elasto-viscoplastic fluids. *Journal of Rheology*, v. 62, n. 1, p. 321–342, 2018. Citado na página 29.

XIAO, Q.; YANG, N.; ZHU, J.; GUO, L. Modeling of cavern formation in yield stress fluids in stirred tanks. *AIChE Journal*, v. 60, n. 8, p. 3057–3070, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

ZHANG, H.; ZHANG, L.; LI, J. Numerical simulation of multiphase flow in agitated vessels. *Chemical Engineering Science*, v. 66, n. 16, p. 3845–3855, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 18, 29 e 31.